

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Hodnocení parametrů integrity povrchové vrstvy  
po aplikaci konvenčního obrábění**  
Evaluation of Surface Layer Integrity Parameters  
after Application of Conventional Machining

Student:

Vedoucí diplomové práce:

Bc. Jiří Klein

Ing. Jiří Lichovník

Ostrava 2020

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Klein**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: **Hodnocení parametrů integrity povrchové vrstvy po aplikaci  
konvenčního obrábění  
Evaluation of Surface Layer Integrity Parameters after Application of  
Conventional Machining**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický rozbor integrity povrchu a konvenčního obrábění.
3. Praktická část.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

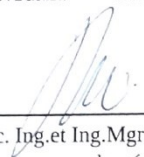
HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.  
NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK M. *Experimentální metody v trieskovom obrábění*. Žilina: EDIS Žilina. 2007, 243s. ISBN 978-80-8070-711-8.  
WHITNEY, E. Dow. *Ceramics Cutting Tools – Materials, Development and Performance*. Gainesville, Florida : Noyes Publication New Jersey, 1994, 350 p. ISBN 0-8155-1355-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Lichovník**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

#### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Táto práce byla vypracována se souhlasem vedení společnosti Freso comp., s.r.o.

V Ostravě dne 10.května 2020.

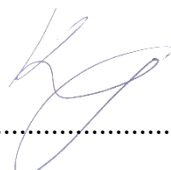


Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 10. května 2020.



.....

Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jiří Klein

Adresa trvalého pobytu autora práce: Tísek 245, Tísek 743 01

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Klein, J. *Hodnocení parametrů integrity povrchové vrstvy po aplikaci konvenčního obrábění: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 76s. Vedoucí diplomové práce: Lichovník, J.

Diplomová práce se zabývá integritou povrchu po konvenčním obrábění. Úvodní část obsahuje rešerši na technologii HSC obrábění od historie po využití a přínosy. Dále integrita povrchu zaměřená na drsnost povrchu a povrchová napětí. V diplomové práci je popsána a použita metoda sestavení experimentu Design of Experiments (DOE). Hlavní náplň diplomové práce je experimentální část, ve které je otestován vliv řezných parametrů na integritu povrchu po konvenčním obrábění. Bylo testováno, zda bude dosaženo HSC obrábění při maximálních parametrech konvenčního stroje. V poslední části je vyhodnocení naměřených hodnot, které jsou sepsány do přehledných tabulek a grafů. Shrnutí zjištěných faktů a doporučení pro další využití v praxi.

## **ANNOTATION OF THE THESIS**

Klein, J. *Evaluation of Surface Layer Integrity Parameters after Application of Conventional Machining: Master thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering metrology, 2020, 76s. Thesis head: Lichovník, J.

The thesis deals with the integrity of the surface after conventional machining. The introductory part contains an annotation on the technology of HSC machining from history to use and benefits. Furthermore, surface integrity focused on surface roughness and surface tensions. The thesis describes and uses the method of setting up the Design of Experiments (DOE) experiment. The main content of the diploma thesis is the experimental part, in which the influence of cutting parameters on the integrity of the surface after conventional machining is tested. It was tested whether HSC machining will be achieved at the maximum parameters of a conventional machine. The last part is the evaluation of measured values, which are written in clear tables and graphs. Summary of findings and recommendations for further use in practice.

# Obsah

Seznam zkratk .....	8
Úvod.....	10
1. Cíle diplomové práce .....	11
2. Vysoko rychlostní obrábění (HSC).....	12
2.1. Teoretická hlediska HSC obrábění .....	12
2.2. Historie HSC .....	14
2.3. Tvorba třísky při HSC obrábění .....	16
2.4. Využití a přínos HSC obrábění.....	18
2.5. Stroje a nástroje pro HSC obrábění .....	19
3. Integrita povrchu .....	21
3.1. Jakost povrchu obrobených ploch součástí .....	21
3.2. Hodnocení kvality povrchu po obrábění .....	22
3.3. Drsnost povrchu.....	22
3.3.1. Charakteristiky drsnosti (ČSN EN ISO 4287:1999).....	23
3.3.2. Metody měření drsnosti povrchu .....	24
3.4. Povrchová napětí .....	27
3.4.1. Vznik zbytkových napětí .....	27
3.4.2. Měření zbytkových napětí .....	29
3.4.3. Metoda rentgenové difrakce (X-Ray) .....	32
4. Design of Experiments – DOE.....	35
5. Návrh experimentální činnosti .....	37

5.1.	Volba obráběného materiálu.....	38
5.2.	Volba obráběcího stroje.....	39
5.3.	Volba obráběcího nástroje a materiálu řezné části .....	40
5.4.	Volba řezných podmínek.....	41
5.5.	Schéma experimentu .....	43
5.6.	Měřicí přístroje a metody měření v experimentu .....	44
5.6.1.	Měření drsnosti povrchu .....	45
5.6.2.	Měření zbytkových napětí .....	46
6.	Vyhodnocení výsledků experimentu.....	47
6.1.	Výsledky drsnosti povrchu .....	47
6.2.	Výsledky zbytkového napětí .....	58
6.3.	Poznatky z obrábění .....	62
7.	Zhodnocení výsledků a přehled kladů pro praxi .....	64
7.1.	Vyhodnocení naměřených hodnot drsnosti povrchu .....	64
7.2.	Vyhodnocení naměřených hodnot zbytkových napětí .....	64
8.	Závěr diplomové práce.....	65
9.	Poděkování.....	67
10.	Seznam použité literatury .....	68
11.	Seznam obrázků.....	72
12.	Seznam tabulek.....	74
13.	Seznam grafů .....	75
14.	Seznam příloh .....	76

## Seznam zkratek

Označení	Význam	Jednotka
C	uhlík	[-]
Cr	chrom	[-]
D	průměr nástroje	[mm]
F	síla	[N]
F <sub>t</sub>	třecí složka řezné síly	[N]
Mn	mangan	[-]
P	fosfor	[-]
R <sub>a</sub>	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
R <sub>mr(c)</sub>	materiálový poměr profilu	[μm]
R <sub>Sm</sub>	průměrná šířka prvků profilu	[μm]
R <sub>t</sub>	celková výška profilu drsnosti	[μm]
R <sub>zi</sub>	aritmetická hloubka profilu	[μm]
R <sub>z1max i</sub>	maximální prohlubeň profilu drsnost	[μm]
R <sub>z</sub>	největší výška profilu	[μm]
S	síra	[-]
Si	křemík	[-]
T	teplota	[°C]
TiAlN	nitrid hliníku a titanu	[-]
V	vanad	[-]
a <sub>p</sub>	hloubka řezu	[mm]
d	vzdálenost	[mm]
d <sub>0</sub>	původní mřížková vzdálenost	[mm]
f <sub>z</sub>	posuv na zub	[mm]
n	otáčky vřetene	[min <sup>-1</sup> ]
v <sub>c</sub>	řezná rychlost	[m·min <sup>-1</sup> ]
θ	Braggův úhel	[°]
Φ	rovina stříhu	[-]
δ	úhel řezu	[°]
ε	elastická deformace	[-]
λ	vlnová délka	[m]



$\sigma$	normálové napětí	[Pa]
$\tau$	smykové napětí	[Pa]
$\varphi$	úhel tření	[°]
BCC	prostorově středěnou krystalovou mřížkou	[-]
CBN	kubický nitrid boru	[-]
DOE	Design of Experiments	[-]
FCC	plošně středěnou krystalovou mřížkou	[-]
GPS	geometrické požadavky na výrobky	[-]
HSC	Hight speed cutting	[-]
K	konec	[-]
PC	počítač	[-]
PVD	Physical Vapour Deposition	[-]
RTG	rentgen	[-]
S	střed	[-]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
Z	začátek	[-]

## Úvod

Jednou z nejrozšířenějších technologií v oblasti strojírenství v dnešní době je obrábění. Problematika vysokorychlostního obrábění nabývá stále více na významu. Důkazem rozvoje tohoto oboru je stále vyšší počet vyrobených strojů umožňujících vysokorychlostní obrábění. Konvenční obrábění je postaveno na robustních nástrojích a tuhých strojích, zatím co rychlostní obrábění je založeno na vyšší řezné rychlosti a snižování vyšších otáček, vyšších posuvech a menších průřezů třísek. Pozitivním efektem při HSC obrábění je měknutí třísky, a to z důvodu teplot blízkých teplotě tavení daného materiálu a s tím spojené menší tření po čele nástroje a rychlejší odvod třísky z místa řezu. Jelikož většina teploty odchází v tříse nedochází k přenosu tepla do obrobku a do řezného nástroje. Mezi další kladné faktory patří zmenšení řezných sil, vyšší přesnost obrábění a kvality povrchu, prodloužení životnosti nástroje a také se díky vysokým otáčkám dostáváme mimo hranici oblasti tzv. samobuzených kmitů.

Jako jeden z hlavních cílů, při přechodu výroby na vysokorychlostní, je zvýšení produktivity. Zvýšení produktivity musí finančně překonat pořizovací a provozní náklady, které jsou pro vysokorychlostní obrábění značně vyšší než pro konvenční způsob. Jako další cíle se uvádí zlepšení kvality povrchu a zvýšení životnosti nástroje. [34]

Zbytková napětí jsou podstatnou složkou integrity povrchu. Zbytková napětí se mohou v materiálu vyskytovat působením předchozího způsobu výroby, anebo právě vzniknou během procesu obrábění. V materiálu mohou být napětí tahová či tlaková. Ideální stav povrchové vrstvy nastává, když napětí jsou nulová. Přijatelná jsou malá tlaková napětí, u kterých naměříme malé hodnoty normálového napětí. Opačně pokud bude naměřeno záporných hodnot jedná se o napětí tahové. U tahového napětí může dojít k porušení ucelenosti součásti, až k pozdějšímu vyčlenění z provozu. Zbytková napětí mají vliv jak na mechanické vlastnosti materiálu, tak i mohou způsobit kupříkladu korozi. Podstatné je znát charakter a velikost zbytkového napětí, abychom tomuto mohli předcházet.

# 1. Cíle diplomové práce

Hlavním cílem diplomové práce bude analyzovat současný stav HSC obrábění, integritě povrchu a prohloubit dosavadní znalosti o dané problematice. Dále dle Design of Experiment (DOE) bude navržena a experimentálně ověřena funkčnost podmínek obrábění, které budou upraveny a nastaveny na základě předchozích zkušeností s obráběním podobných materiálů a parametrů stroje. Pozornost bude věnována zejména integritě povrchu. Konkrétně na drsnosti povrchu a zbytkových napětí. Výsledky budou aplikovány do praxe za účelem zlepšení integrity povrchu.

## Jednotlivé cíle diplomové práce:

- zpracovat rešerši současného stavu vysokorychlostního obrábění, integrity povrchu a DOE,
- na základě analýzy „Design of Experiment“ navrhnout proces,
- stanovit vhodné parametry pro obrábění daného materiálu,
- vyhodnotit drsnost v závislosti na řezných podmínkách,
- vyhodnotit zbytková napětí,
- vyhodnotit výsledky a stanovit přínosy pro praxi.

## 2. Vysoko rychlostní obrábění (HSC)

### 2.1. Teoretická hlediska HSC obrábění

Mechanismus tvorby třísky je jedním s hlavních rozdílů mezi rychlostním a konvenčním obráběním. Oddělování třísky je velmi spletitý proces, který je závislý na mnoha faktorech, zvláště na fyzikálních vlastnostech daného materiálu a jejich vazbě na podmínkách plastické deformace. Běžně platí, že při zvyšující se řezné rychlosti se oblast plastické deformace v pásmu tvorby třísky zužuje a ke vzniku třísky dochází plastickým skluzem v jediné rovině, tzv. rovině stříhu. [1]

Díky podmínce minimální vynaložené práce lze získat velikost úhlu roviny stříhu  $\Phi$ .

Záměrem řešení je nalezení úhlu  $\Phi$ , pro který bude síla  $F$ , kterou nástroj působí na odřezávanou vrstvu, minimální. Úhel střížné roviny závisí obzvláště na úhlu řezu  $\delta$  a úhlu tření  $\varphi$ :

Protože úhel  $\varphi$  vyjadřuje tzv. střední součinitel tření, který obsahuje jednak vnitřní tření v materiálu třísky, jednak vnější tření mezi třískou a čelem nástroje, bude úhel  $\varphi$  ovlivněn všemi řeznými podmínkami, které mají vliv na velikost úhlu  $\varphi$ . Hned po fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu má největší vliv řezná rychlost  $v_c$ , a to na deformační rychlost a množství vyvinutého tepla a tím i na teplotu povrchových vrstev třísky. Dále je ovlivněn úhel  $\varphi$  mazacím médiem, který snižuje součinitel smykového tření na čele nástroje. [1]

V předpokladech HSC obrábění se hodnoty otáček a posuvů dosahují 5 až 10krát vyšších hodnot než při konvenčním obrábění. To značí rostoucí řeznou rychlost i vyšší množství práce potřebné k řezání, která se mění v teplo. Většinová část vzniklého tepla se odvádí třískou. Teplota v odváděné třísce se přibližuje teplotě tavení obráběného materiálu. V tabulce 1 jsou uvedeny teploty třísek při obrábění jednotlivých druhů materiálu. [1]

Ocel	Šedá litina	Bronz	Hliník
1500 °C	1300 °C	1000 °C	600 °C

Tab.1 Teplota třísek při procesu HSC [1]

Při určité řezné rychlosti se náhle změní fyzikální a chemické vlastnosti třísky a transformace obráběného materiálu v třísku probíhá v rovině stříhu za vysoké teploty, která způsobí její podstatné změknutí a střední součinitel tření  $f = \tan \varphi$  se výrazně zmenší. Tím je značně eliminován vliv normálové složky řezné síly  $F_N$  na čele nástroje, poklesne celkový řezný odpor, a tedy i třecí složka řezné síly  $F_t$ , důsledkem toho se zmenší intenzita opotřebení čela nástroje a úhel střížné roviny  $\Phi$  se zvětší při značně zmenšeném úhlu tření  $\varphi$  podle předchozí rovnice na hodnotu:

Jestliže většina tepla, které vznikne při obrábění, je odvedeno v tříске, pak je zmenšován vliv tepelného působení na vlastnosti povrchové vrstvy. Tím je ovlivněn vznik nežádoucích reziduálních pnutí po obrábění. Tato pnutí jsou vybudována plastickou deformací povrchové vrstvy ovlivněná teplotou vzniklou při řezu. [1]

Záměrem těchto technologií je dosažení řádově vyšší kvality řezného procesu, integraci strojních operací i pružnou automatizaci. Zásada vysokorychlostního obrábění je zkvalitnění obráběného povrchu, zvětšení úběru třísek, a z něj plynoucí prodloužení životnosti nástroje.

Z tab. 2.2 a 2.3 je patrné, že vysokorychlostní obrábění má své specifické hodnoty pro řeznou rychlost rozděleny zvlášť pro každý materiál i pro každou obráběcí technologii. To je důvod velmi složitěho určení, kdy se jedná o obrábění vysokorychlostní a kdy ne. Často se pak v praxi stává, že je obrábění označeno za vysokorychlostní, ale řezné podmínky tomu neodpovídají.

<b>Materiál</b>	<b>Řezná rychlost [m.min<sup>-1</sup>]</b>
<b>Ocel</b>	800–1100
<b>Slitiny Ti</b>	150-1000
<b>Slitiny Ni</b>	160-280
<b>Litina</b>	900-1600
<b>Slitiny AL</b>	3000-6000
<b>Plasty zpevněné vlákny</b>	2800-8000
<b>Bronz, mosaz</b>	1100-3000

*Tab. 2 Řezné rychlosti HSC pro různé materiály [2]*

Metoda obrábění	Řezná rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]
Soustružení	800-8000
Vrtání	100-1100
Frézování	560-6000
Frézování závitů	120-400
Protahování	12-70
Vystružování	10-250
Řezání	70-200
Broušení	6000-9500

*Tab. 3 Řezné rychlosti HSC pro různé metody obrábění [2]*

Rovněž zde dochází ke snižování tepelného a mechanického zatěžování nástroje, čímž se prodlužuje jeho životnost. Snížení řezných sil za současného omezení tepelného toků do nástroje, i obrobku vede ke zvýšení přesnosti a kvality obrobeného povrchu. „Suché obrábění“ znamená vyloučení či minimalizaci používání tzv. „procesních kapalin“, při současném snížení nákladů na jejich pořízení, filtraci, recyklaci a konečně také likvidaci. [2]

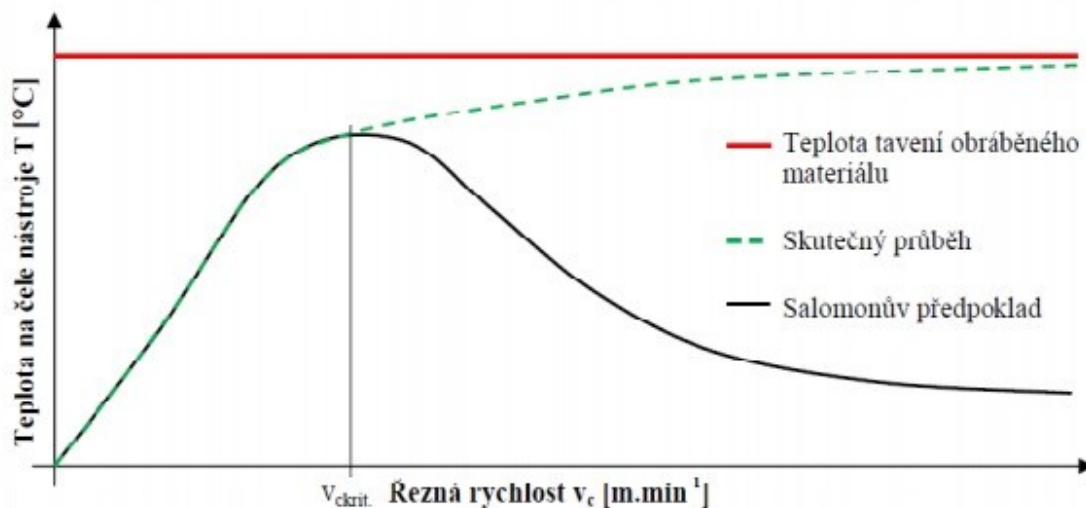
## 2.2. Historie HSC

Koncepci technologie HSC dosáhl Carl Salomon po mnoha pokusech mezi léty 1924 a 1931. Dřívější pokusy se nezdařily, protože tehdejší stroje a celkové vybavení nedokázaly dosáhnout požadovaných rychlostí. Salomon dosáhl odpovídajících řezných rychlostí při frézování hliníkové slitiny nástrojem o velkém průměru. [3]

Domníval se, že řezná teplota roste s rostoucí řeznou rychlostí a po překročení určitého maxima rapidně klesá. Odůvodnění pro pokles teploty si vysvětloval tím, že se primární deformace v oblasti tvoření třísky s řeznou rychlostí zmenšuje, jelikož fáze plasticity materiálu je závislá na rychlosti deformace, tudíž se materiál se zvyšující řeznou rychlostí

stává méně plastický. Tento předpoklad byl však vyvrácen v pozdějších letech. Bylo prokázáno, že zpočátku rychlý nárůst teploty se zpomalí a střední teplota řezání se s rostoucí řeznou rychlostí asymptoticky přibližuje teplotě tavení obráběného materiálu. [3]

Obr. 1 - Závislost teploty na čele nástroje na řezné rychlosti [3, 4]



V roce 1958, Vaughn studoval řadu proměnných podílejících se na tradičním obrábění, které se staly velmi důležité pro HSC. V důsledku toho je rychlost, při které může být kov obráběn, ovlivněna:

- Velikost a typ stroje
- Typ nástroje
- Dostupný výkon
- Druh materiálu, který se bude opracovávat
- Rychlost, posuv a hloubka řezu [3]

Těchto pět proměnných může být dále členěno:

- Tuhost mezi strojem, nástrojem a obrobkem
- Odchyly rychlosti od nejpomalejších po nejrychlejší, v závislosti na použitých obráběcích strojích
- Odchyly posuvu a hloubce řezu z lehkých do těžkých a zda obráběno bez chlazení, či s pomocí maziva nebo chlazení
- Typ a materiál řezného nástroje
- Druh tvaru a geometrie řezného nástroje
- Typ a fyzikální vlastnosti pracovního materiálu

- Specifické požadavky jako požadovaná řezná rychlost, životnost nástroje, povrchová úprava, požadovaný výkon, zbytková napětí a tepelné účinky [3]

Nedávny pokrok v počítačově řízených systémech poskytl schopnost přesně manipulovat s vysoce výkonnými stroji na obrábění. Kromě toho pokrok v konstrukci ložisek a vřeten, výměny nástrojů, upínacích systému nástrojů a materiálů řezných nástrojů, přispěl k prokázání Vaughnových experimentů. [3]

Během sedmdesátých let proběhla série testů amerického námořnictva s Lockheed Missiles a Space Company, které prokázaly, že bylo ekonomicky proveditelné zavést HSC do výrobního prostředí, aby došlo k výraznému zlepšení produktivity. V pozdních sedmdesátých letech a časných osmdesátých letech, General Electric Company poskytovala databázi pro obrábění hliníkových slitin, titanových slitin, niklových slitin a oceli. [3]

### **2.3. Tvorba třísky při HSC obrábění**

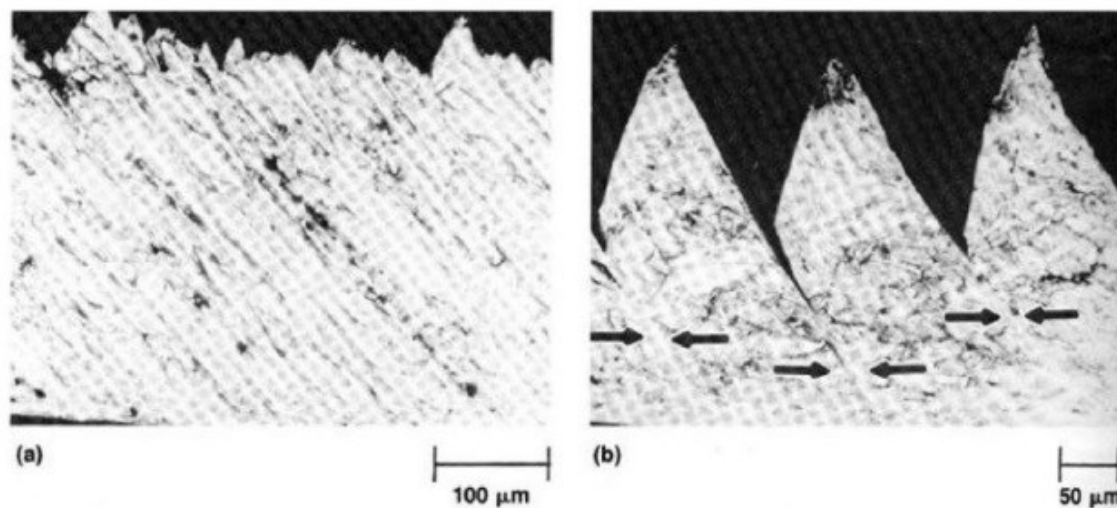
Během HSC obrábění jsou pozorovány dva typy třísek, v závislosti na druhu obráběného materiálu a jeho metalurgického stavu (obrázek 2).

Soudržná (plynulá) tříska se vytváří u kovů a slitin s krychlovou, prostorově (BCC) nebo plošně (FCC) středěnou krystalovou mřížkou s vysokou tepelnou vodivostí a malou tvrdostí jako jsou např. slitiny hliníku nebo oceli s nízkým obsahem uhlíku. [3]

Článekovitě souvislé třísky se vyskytují převážně u materiálů, jakými jsou titanové a niklové slitiny. Tyto slitiny mají hexagonální těsnou krystalovou mřížkou a vyznačují nízkou tepelnou vodivostí a vysokou tvrdostí. [3]

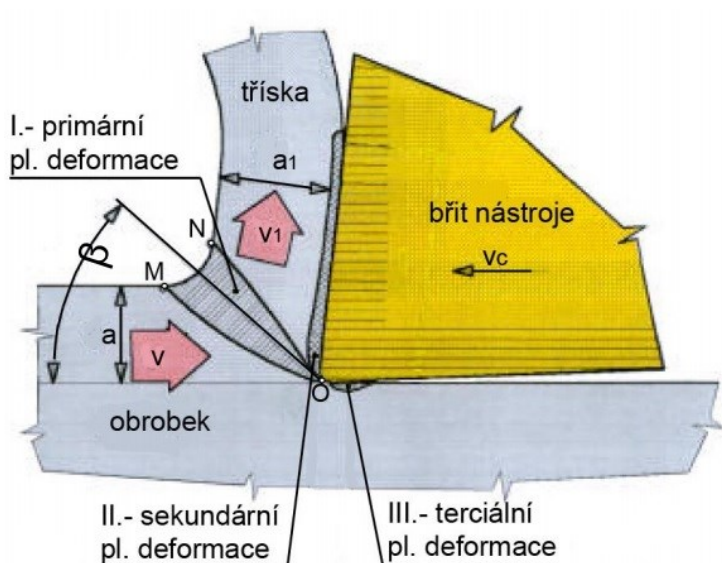
Druh vzniklé třísky pro daný obráběný materiál závisí také na velikosti řezné rychlosti. Proto je u vysokorychlostního obrábění pozorován vznik soudržné plynulé třísky, soudržné článekovité třísky i třísky elementární. Při nízkých řezných rychlostech se může pro jeden obráběný materiál vytvářet plynulá soudržná tříska a od určité řezné rychlosti se začne vytvářet soudržná článekovitá tříska. S dalším nárůstem řezné rychlosti se změní soudržná článekovitá tříska na třísku elementární. [3,5]





Obr. 2 - Třísky po HSC obrábění (a) Soudržná tříska, (b) článková tříska [3]

Průběhem procesu tvorby a následujícího oddělení třísky prochází oddělovaný materiál stavy pružné napjatosti a plastické deformace, než dojde k jeho oddělení lomovým porušením. V tak zvaném kořenu třísky dochází k přeměně materiálu v třísku. Tato oblast se dělí na další tři podoblasti, kde dochází k podstatnějším plastickým deformacím. Největší plastické deformace vznikají v primární oblasti deformace. Probíhá zde proces přeměny materiálu v třísku. Oblast sekundární plastické deformace je charakterizována velkou plastickou deformací a velkým vlivem tření třísky po čele nástroje. Oblast terciální plastické deformace je poslední třetí oblastí, která má vliv na výsledný povrch součásti, jelikož je důsledkem existence poloměru ostří nástroje, díky kterému povrch nevzniká pouze obráběním, ale i procesy tváření

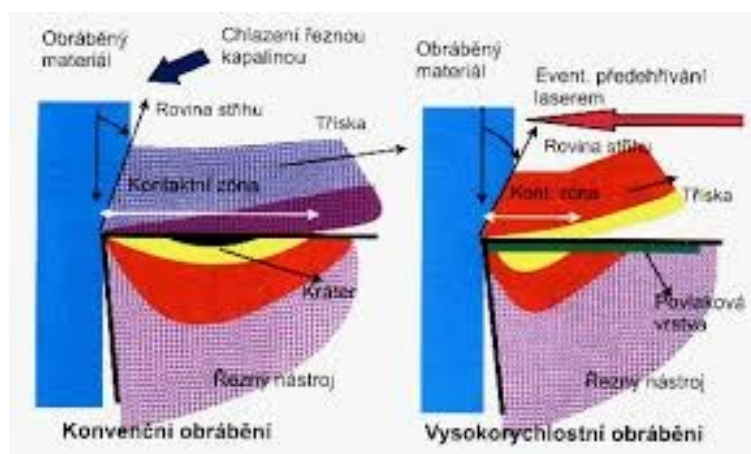


Obr.3 - Průběh tvorby třísky (6)

## 2.4. Využití a přínos HSC obrábění

Zásadní přínos vysokorychlostního obrábění (HSC) je snížení výrobních nákladů se zvýšením produktivity, snížení strojních časů a často i při obrábění tvrdých materiálů a kalených ocelí. Mezi další přínosy je zvýšení konkurenceschopnosti vlivem kratších náběžných a dodacích lhůt.

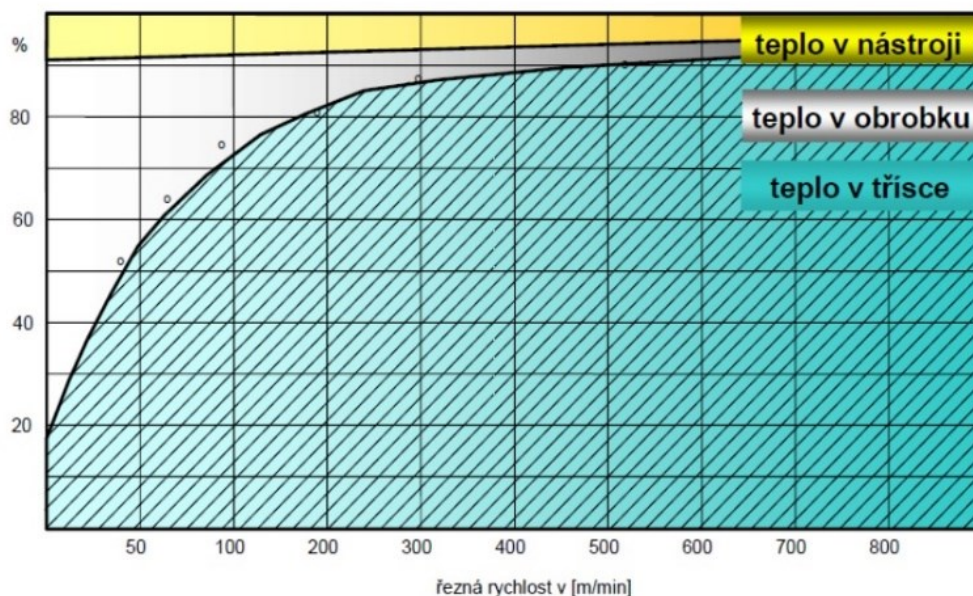
Díky vyšší řezné rychlosti dochází k menšímu koeficientu pěchování třísky a v primární plastické deformaci nedochází ke zpevnění materiálu a jeho zvýšení tvrdosti, viz obrázek 4.



Obr. 4 - Mechanismus tvorby třísky pro konvenční a HSC obrábění [7]

### Hlavní výhody aplikace HSC obrábění:

- dosažení vysoké kvality obráběného povrchu, zpravidla bez nebezpečí vzniku nežádoucích vnitřních pnutí na obrobeném povrchu;
- zvětšení objemu odebraného materiálu při hrubování cca o 35% (zvýšení řezné rychlosti, zvýšení posuvové rychlosti);
- zmenšení řezné síly o třetinu díky menšího přechování třísky;
- výrazné snížení tepelného zatížení nástroje a obrobku z důvodů vysoké řezné rychlosti je vzniklé teplo hlavně odváděno třískami viz obrázek 5;
- snížení pravděpodobnosti vzniku chvění, jelikož vysoká frekvence otáčení vřetena je mimo oblast samobuzeného kmitání;
- dá se aplikovat obrábění bez chlazení, které mimo ekonomických výhod (odpadají náklady na chladicí kapaliny a jejich likvidaci) má i výrazné ekologické dopady;
- optimální obrábění tenkých obrobků. [1,2,7]



Obr. 5 - Rozdělení odváděného tepla v závislosti na  $v_c$  pro obrábění oceli [7]

#### Hlavní nevýhody aplikace HSC obrábění:

- drahé strojní vybavení;
- speciální nástroje pro HSC;
- speciální upínání nástrojů;
- odvádění velkého množství třísek za krátkou dobu;
- rychlejší otupování břitů;
- častější opotřebení strojních součástí (ložiska, řemeny)
- vyšší odbornost obsluhy
- náklady na zajištění bezpečnosti pro obsluhu [1,2,7]

## **2.5. Stroje a nástroje pro HSC obrábění**

Stroje pro HSC obrábění mají několikanásobně větší výkon a produktivitu oproti konvenčním strojům. Tyto stroje mohou být konvenční i CNC, avšak musí dosahovat otáček frézovacích vřeten 10 000-200 000 min<sup>-1</sup>, otáček vřeten soustruhu 5 000-15 000 min<sup>-1</sup>, s výkonu od 15 kW až po 60 kW, s maximální rychlostí pracovních posuvů 10-40 m.min<sup>-1</sup>, rychloposuvů 90-120 m.min<sup>-1</sup> a zrychlením až 2 g. [1]

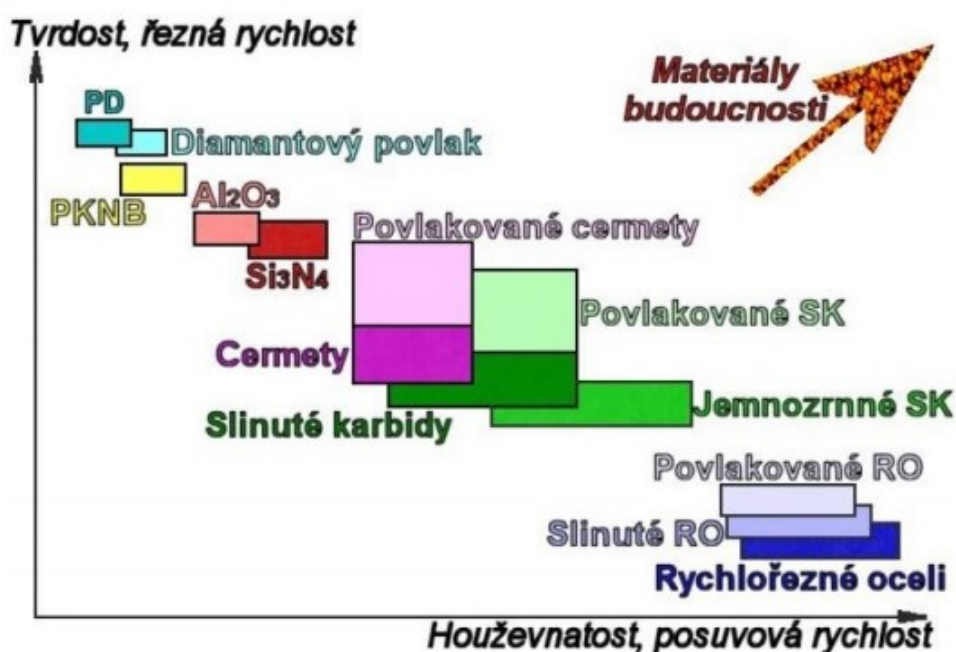
### Konstrukční požadavky na HSC stroje:

Z požadavků na konstrukci obráběcích strojů zaujímá schopnost vyšší vlastní frekvence rámu a minimalizace pohyblivých hmot umožňujících dosažení požadovaných rychlostí i zrychlení prioritní místo. Rovněž je vyžadován dobrý útlum relativních kmitů mezi nástrojem a obrobkem. Taktéž redukce, případně eliminace rázů od zrychlovaných hmot do základu není nevýznamná. [8]

Toto se také týká dokonalého a rychlého odvodu třísek z obrobku, pracovního prostoru stroje, z blízkosti rozhodujících částí rámu a ze stroje vůbec. Požaduje se nekompromisní eliminace tepla přímo u jeho zdrojů, tepelná stabilizace rámu i uzlů s přibližně konstantní relativní tuhostí v celém pracovním prostoru stroje. [8]

Nástroje pro HSC obrábění musí mít vlastnosti jako jsou vysoká tvrdost, houževnatost, odolnost proti opotřebení, tepelnou vodivost a pevnost v ohybu, proto aby se předešlo možnému ulomení nástroje a snížilo se opotřebení. Tyto nároky by měl řezný materiál splňovat při vysokých teplotách, řezném výkonu a úběru po dostatečně dlouhou dobu. [9]

Vysokorychlostní obrábění ocelí umožňují zejména povlakované slinuté karbidy, cermety a řezná keramika. Kubickým nitridem boru (CBN) se obrábí především kalené oceli a litiny a vysokorychlostní broušení kalených materiálů se provádí kotouči s keramickým pojivem a kubickým nitridem boru. [11].



Obr. 6 - Oblast použití řezných nástrojů s ohledem na materiál [10]

### 3. Integrita povrchu

Integrita povrchu je odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek. [12]

Již začátkem 70. let byl definován problém i obsah integrity funkčních ploch součástí, kdy bylo ukázáno, že je nutné dávat do souvislosti podmínky technologických operací s požadavky jakosti, spolehlivosti a životnosti součástí i zařízení.

#### 3.1. Jakost povrchu obrobených ploch součástí

Vývoj v oblasti výrobní techniky, řezných materiálů, je většinou hodnocen z hlediska vlivu na produktivitu práce. Vezme-li se ale v úvahu plné využití řezivosti nových nástrojových materiálů a příkonů strojů, které jsou několikanásobné ve srovnání s klasickými, vzniká zde otázka, zda toto množství energie převedené na břit nástroje neovlivní výrazněji vlastnosti obrobeného povrchu, především jeho jakost. [12]

Jakost obrobeného povrchu je možné posuzovat podle následujících hledisek:

- přesnosti rozměru a tvaru,
- drsnosti a mikrostruktury,
- vlastností povrchové vrstvy. [12]

Přesnost rozměru a tvaru působí nepřímo na technologický proces, ale je dána vlastní přesností stroje, tuhostí systému stroj-nástroj-obrobek a dalšími faktory. [12]

Drsnost a mikrostruktura povrchu je ovlivněna přímo procesem řezání. Nejpodstatnějšími prvky tohoto vlivu jsou řezná rychlost, tvar nástroje, působení různých řezných materiálů, jejich opotřebení apod. [12]

Vlastnosti povrchové vrstvy jsou vyjadřovány strukturními změnami, stupněm zpevnění, které jsou úměrné velikosti zbytkových napětí. Vzhledem k tomu, že intenzita procesu řezání se stále zvyšuje v důsledku dalšího růstu vyšších řezných rychlostí a vyššího energetického působení na břit nástroje, je nutno počítat s tím, že vlastnosti povrchové vrstvy součástí se mohou výrazně měnit vzhledem k vlastnostem materiálu ve větší vzdálenosti od povrchu. [12]

Řezné podmínky mají značný vliv na vlastnosti povrchové vrstvy. Toto tvrzení můžeme konstatovat z teoretického rozboru procesu řezání a na základě experimentálního výzkumu. Je prokázáno, že je možné považovat účinek různých technologií a řezných podmínek, ať je to řezná rychlost, druh nástrojového materiálu, nebo změna dokončovací operace, tak ve všech těchto případech mají vliv na vlastnosti povrchové vrstvy. [12]

### **3.2. Hodnocení kvality povrchu po obrábění**

V soudobé strojírenské výrobě patří integrita povrchu k jednomu z největších problémů. Po obráběcím procesu má povrchová vrstva rozdílné vlastnosti, než má obráběný materiál. Vlastnosti výsledné povrchové vrstvy ovlivňuje řada faktorů, např. deformační procesy, tření, teplota, geometrie břitu, řezné podmínky apod.

Podle následujících hledisek můžeme posuzovat integritu obrobené plochy:

- přesnost tvaru a rozměru (topografie),
- mikrostruktura materiálu (strukturní změny v povrchové vrstvě),
- mikrogeometrie povrchu (stupeň, hloubka a charakter zpevnění),
- vlastnosti povrchové vrstvy a podpovrchové vrstvy (smysl, velikost a průběh zbytkových napětí)

### **3.3. Drsnost povrchu**

Použitím kterékoli technologie obrábění vzniká na povrchu technických ploch nerovnost, která má četný význam na funkci těchto ploch. Jelikož povrch představuje prostorový útvar, problém posuzování nerovností se řeší redukcí do roviny řezu rovinu kolmou k povrchu. Tím se získá profil, který je základním zdrojem informací.

Skutečný profil povrchu je definovaný jako profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu (povrchu omezující těleso a oddělující ho od okolního prostředí) a dané roviny.

V České republice jsou vydány základní normy pro hodnocení parametrů drsnosti povrchu :

- ČSN EN ISO 4287:1999 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu



- ČSN EN ISO 4288:1996 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu [13]

### 3.3.1. Charakteristiky drsnosti (ČSN EN ISO 4287:1999)

Ra – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu: Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic  $Z(x)$ , v rozsahu základní délky.

Rmr(c) – materiálový poměr profilu (nosný podíl): Poměr (%) délky materiálu elementů profilu  $MI(c)$  na dané úrovni  $c$ , k vyhodnocované délce.

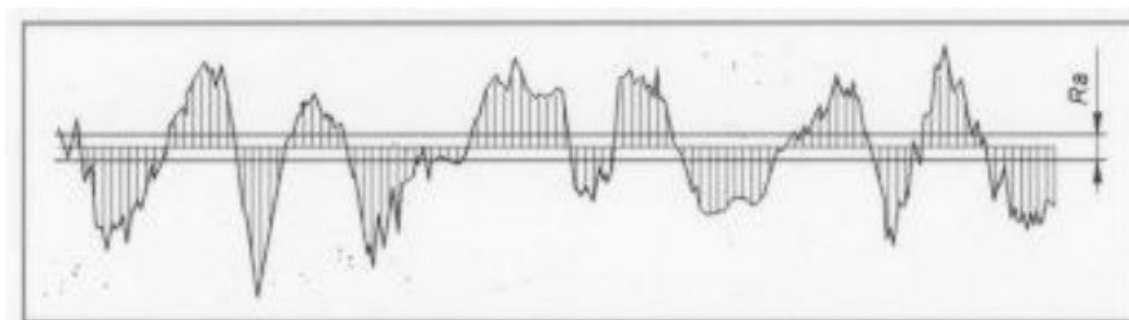
RSm – průměrná šířka prvků profilu: Aritmetický průměr šířek  $X_s$  prvků profilu v rozsahu základní délky neboli určuje šířky prvků profilu v rozsahu základní délky. Jedná se o charakteristiku drsnosti v podélném směru povrchu.

Rt – celková výška profilu drsnosti: Součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocené délky  $l_n$ .

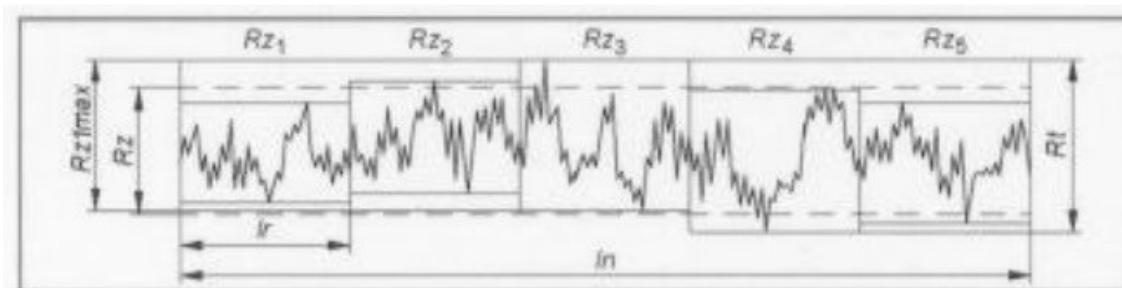
Rz<sub>i</sub> – aritmetická hloubka profilu: Aritmetický průměr nejvyšších výšek profilu v jednotlivých základních délkách  $z$  vyhodnocované délky, standardně obsahující 5 základních délek.

Rz1max – maximální prohlubeň profilu drsnosti: Největších pět  $Rz_i$  hodnot z pěti základních délek  $l_r$  uvnitř vyhodnocované délky  $l_n$ .

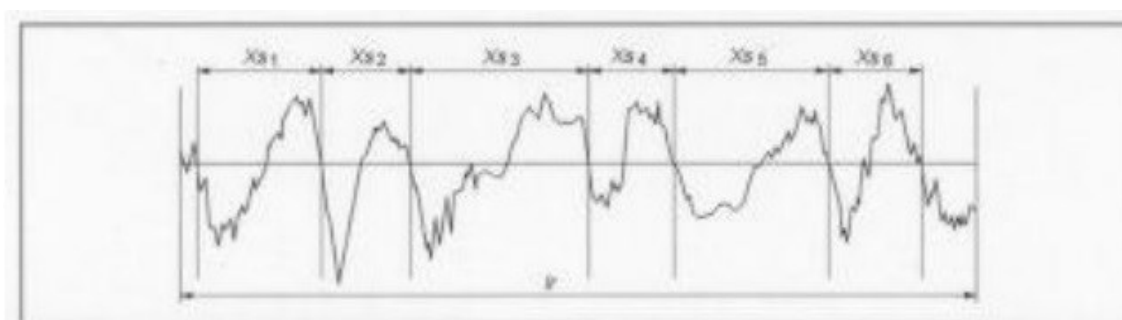
Rz – největší výška profilu: Součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky [13]



Obr. 7 - Průměrná aritmetická úchylka profilu  $Ra$  [14]



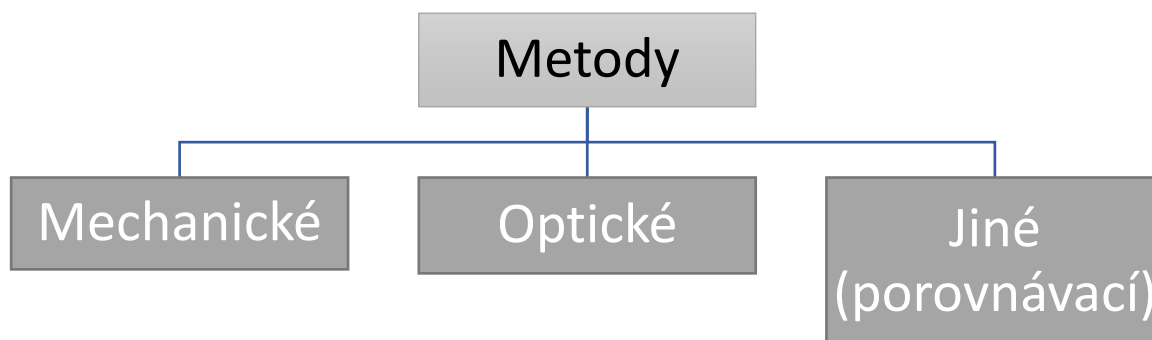
Obr. 8 - Celková výška profilu drsnosti  $R_t$ , největší výška profilu  $R_z$  a maximální prohlubeň profilu drsnosti  $R_{z1max}$  [14]



Obr. 9 - Průměrná šířka prvků profilu RSm jako průměrná hodnota šířky  $X_{S_i}$  profilu součástí [14]

### 3.3.2. Metody měření drsnosti povrchu

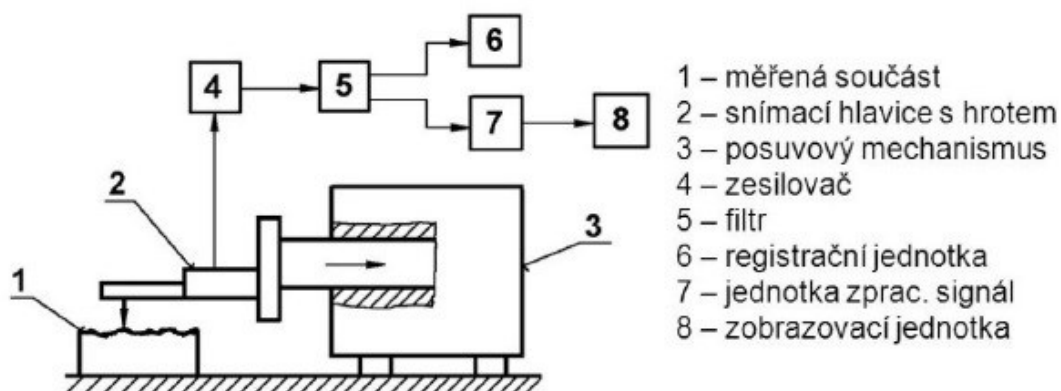
Zjednodušeně lze rozdělit metody a přístroje, pro měření topografie povrchu, do tří základních skupin.





### Mechanická dotyková metoda:

V praxi se jedná o doposud nejběžnější metodu měření, hlavně přímo ve strojírenských výrobních provozech. Při této metodě se odečítají číselné hodnoty jednotlivých parametrů drnosti. Dotykový profilometr se skládá z měřicího hrotu, který je umístěn na pohyblivé tyčince. Měřící hrot je propojen s měřícím přístrojem, který zpracovává příchozí signál z měřicího hrotu.

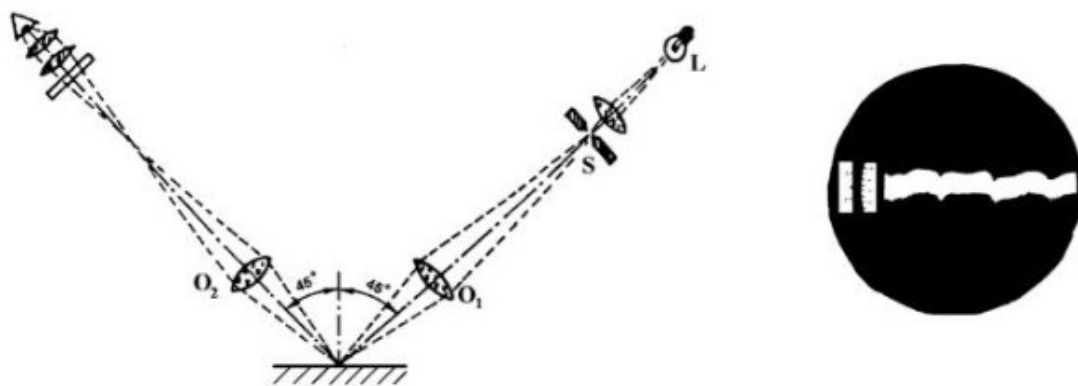


Obr. 10 – Schéma měření drsnosti povrchu dotykovou metodou [16]

### Optické metody:

#### Metoda světelného řezu

Používá se dvojitého mikroskopu. Svazek paprsků (velmi tenký) dopadá na měřený povrch pod úhlem  $45^\circ$ . Odrazem od nerovností vzniká obraz profilu v poli mikroskopu.

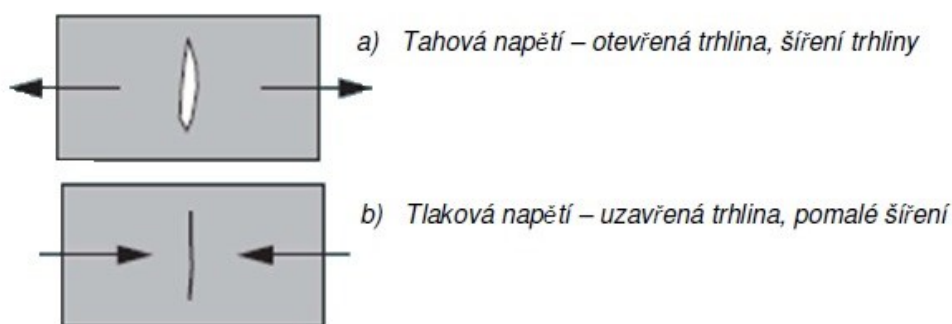


Obr. 11 - Měření drsnosti povrchu metodou světelného řezu [16]



### 3.4. Povrchová napětí

Během obrábění v povrchové vrstvě opracované plochy dochází ke změnám vlastností. Jde hlavně o vady povrchové vrstvy, strukturální změny, zbytková napětí, povrchové trhliny a zpevnění povrchu. Tyto změny vznikají působením plastických deformací obrobeného povrchu a působením teplotních změn v povrchové vrstvě během obrábění. Řezný nástroj silovými účinky deformuje tenkou povrchovou vrstvu opracované plochy. Při procesu obrábění vzniká teplo, které je příčinou ohřevu povrchové vrstvy. Změny fyzikálních a mechanických vlastností zapříčiní právě kombinace deformace a ohřevu a vznikají napětí v této povrchové vrstvě. Toto napětí zůstává v povrchové vrstvě obrobené plochy i po ukončení řezného procesu. Jedná se o napětí zbytková. Ta jsou definována jako napětí, která se v materiálu vyskytují bez dalšího působení vnějšího zatížení. Zbytková napětí se vyskytují buď tahová nebo tlaková. Rovnovážný stav zbytkových napětí závisí na soužití velikosti a směrem napětí a rovněž pružnými vlastnostmi materiálu. [17,18]



Obr. 14 - Napětí

#### 3.4.1. Vznik zbytkových napětí

Základní mechanismy vzniku zbytkového napětí:

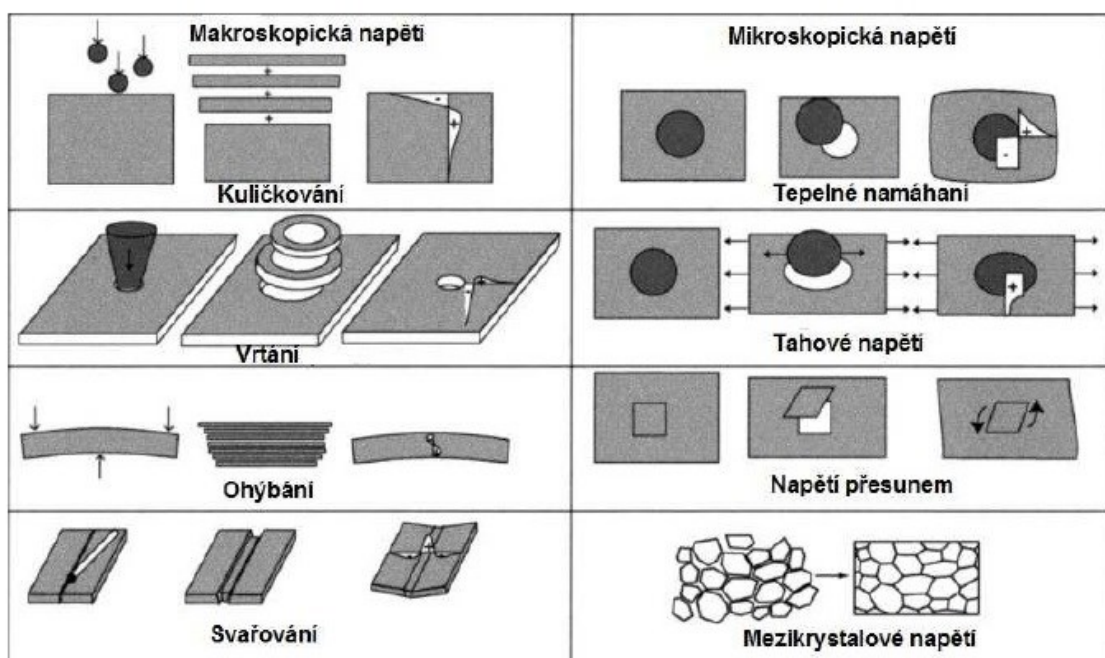
- Nerovnoměrná plastická deformace
- Teplotní roztažnost během nerovnoměrného ohřevu nebo ochlazení
- Strukturální změny materiálu spolu se změnou objemu
- Chemické procesy (difuze, řezné prostředí)

Zbytková pnutí mohou být jak „užitečná“ tak i „škodlivá“. Ta „užitečná“ se využívají třeba při metodě kuličkování. Jedná se o cyklické namáhání součástí, které má vliv na prodloužení životnosti. [18]

„Škodlivá“ pnutí mohou zapříčinit snížení meze únavy, vznik trhlin, napětovou korozi, jak již bylo řečeno, a jiné. [18]

Zbytková pnutí se dají určovat podle několika aspektů. Podle Macheraucha a Tietze lze zbytková napětí dělit podle velikosti objemů, kde se velikost napětí, ani jeho směr nemění:

- pnutí I. druhu – makroskopická, objevují se v makroobjemech materiálu buď jako homogenní tahová nebo tlaková napjatost. Nejčastěji se vyskytují v prudce chladnoucích,
- pnutí II. druhu – mikroskopická, která se projevují v mikroobjemech materiálu. Jednotlivé krystaly mají homogenní napjatost. Nejčastěji se vyskytují při procesech vyvolávajících „plastizování“ materiálu, u nichž vzniká porušení krystalu a tím zmenšení jejich reflexních oblastí,
- pnutí III. druhu – submikroskopická, objevují se v oblastech několika krystalografických rovin. [20]



Obr. 15 – Průběhy makroskopických a mikroskopických napětí [20]

Jelikož technické materiály jsou materiály s heterogenní směsí různých složek, které se chovají různě, vznikají zbytková napětí téměř současně. U zbytkových napětí se provádí měření velmi blízko povrchu, nebo po celém průřezu součásti. Je možné určit napětí I. a II. druhu díky rentgenové tenzometrii, která to umožňuje. [12, 19]

### 3.4.2. Měření zbytkových napětí

Metody zjišťování zbytkových pnutí by se daly rozdělit do tří skupin:

- Destruktivní – dochází ke zničení součásti. Tato skupina zahrnuje většinu metod mechanických, založených na měření deformaci při odstraňování vrstev materiálu,
- Polodestruktivní – je možné provést měření na záměrně přidané části povrchu, která se po měření odstraní. Sem patří například metoda otvoru,
- Nedestruktivní – nedochází ani ke zničení součásti, ani k případné úpravě součásti pro měření. Do této skupiny patří většina metod fyzikálních. [21]

Metoda zjišťování zbytkových napětí	Tvar součástí	Způsob měření	
Mechanické	Plochý tvar	Deformace pásků	Změna délky
			Změna zakřivení
		Vrtání děr	Válcová díra
			Mezikruží
	Rotační tvar	Změna rozměru válce	Odstranění povrchové vrstvy
		Trubka	Rozříznutí trubky
			Odstranění povrchové vrstvy
			Odstranění vnitřní vrstvy
		Kroužek	Rozříznutí
			Změna křivosti
			Podélné pásy z kroužků
	Obecný tvar	Metoda sítí	Deformace sítě
		Křehké laky	Vznik trhlin
		Křehké modely	Vznik trhlin
Fyzikální RTG	Obecný tvar	Difrakce	Vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk		Šíření vln	Změna rychlosti
			Odras vln
			Vnitřní tlumení
Elektrické	Obecný tvar	Změna proudu	Změna potenciálu procházejícího proudu

			Změna velikosti vířivých proudů
			Změna indukčního toku
Magnetické	Obecný tvar	Změny magnetismu	Magnetická indukce
			Zbytkový magnetismus
Akustické	Obecný tvar	Prozvučitelnost	Četnost akustických emisí
Chemické	Obecný tvar	Difuze vodíku	Trhliny na povrchu
		Změna chemické aktivity	Změna struktury

*Tab. 4 Metody zjišťování zbytkových napětí [21]*

### 1) Mechanické metody

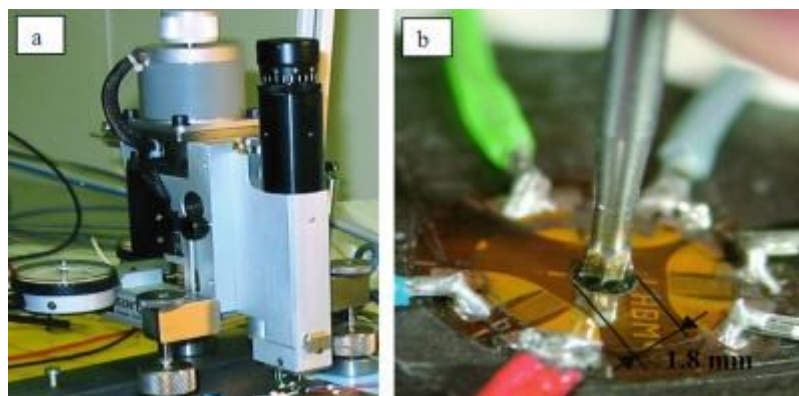
Patří do kategorie destruktivních nebo polodestruktivních metod. Mechanické metody jsou označovány jako metody napětovo – relaxační. Analýza vlastností se provádí z odebrané části vzorku. Po mechanické intervenci je stabilita zbytkového napětí poškozena a dojde k jeho dílčímu uvolnění. Lze jimi určit pouze makroskopická zbytková napětí. Obecně se jejich provedení skládá ze tří kroků:

- odstranění části materiálu vzorku nebo jeho rozdělení na více částí,
- měření deformace (tenzometry),
- vyhodnocení směru a velikosti zbytkových pnutí (analytické metody, metoda prvků).

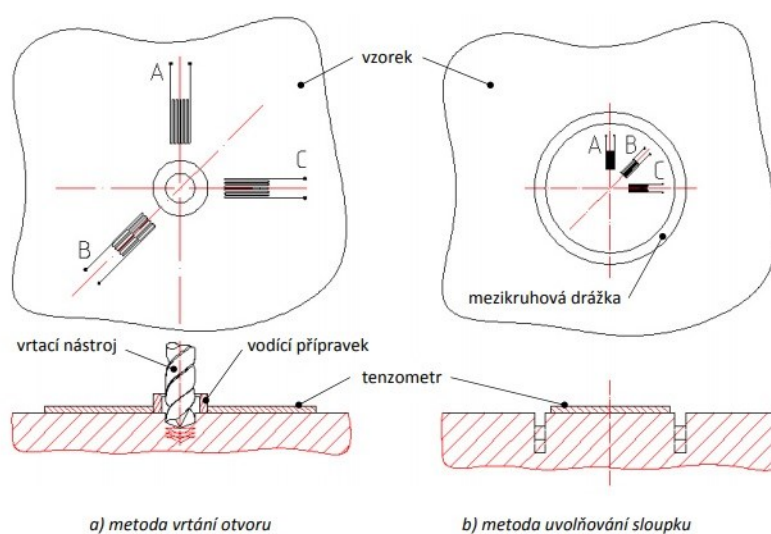
[22]

Pro měření rozdílných tvarů těles (rotační, charakteru desek, hranolů, obecné tvary) jsou použity různé metody měření. Dále jsou uvedeny metody, které se nejčastěji používají v praxi.

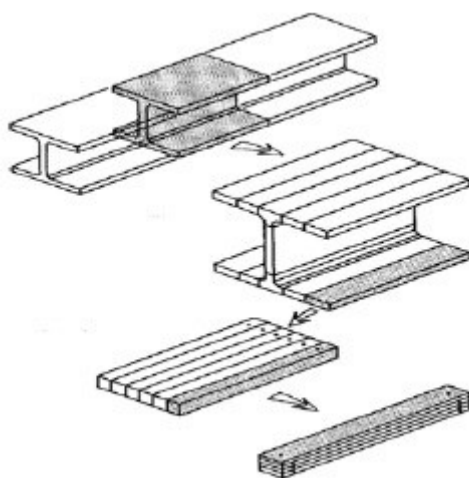
- odvrtávací metoda (vyvrtání otvoru),
- metoda uvolnění sloupku,
- metody odstranění povrchové vrstvy materiálu,
- dělicí metody. [22]



Obr. 16 – a) Zařízení SINT MTS3000 pro měření zbytkových napětí odvrtávací metodou;  
b) tenzometrická růžice a fréza pro měření zbytkových napětí [24]



Obr. 17 – Porovnání metod [22]



Obr. 18 – Dělicí metoda [22]

## 2) Fyzikální metody

Patří mezi metody nedestruktivní. Jsou založeny na vztahu mezi fyzikálními nebo krystalografickými parametry a zbytkovým napětím. Patří sem především tyto metody:

- metoda měření mikrotvrdosti,
- ultrazvukové metody,
- magnetické metody – pouze feromagnetické materiály (magnetrostrikční metoda, metoda využívající Barkhausenův šum),
- difrakční metody (rtg difrakce, neutronová difrakce). [22]

## 3) Chemické metody

Jedná se o využití vyvolaných změn chemickou reakcí a patří sem např.:

- koroze pod napětím,
- difuze vodíku do povrchové vrstvy. [22]

### **3.4.3. Metoda rentgenové difrakce (X-Ray)**

Difrakční analýza zbytkových napětí patří bezesporu k metodám nejperspektivnějším, i když zdaleka ne k nejsnadnějším z hlediska provedení experimentu a interpretace výsledků měření. Specifickými vlastnosti rentgenové difraktometrie jsou:

- informace o napjatosti v povrchové vrstvě materiálu tloušťky 1–10  $\mu\text{m}$ ,
- možnost separace zbytkových napětí I. a II. Druhu (zbytková napětí II. Druhu se projeví rozšířením difrakčních linií),
- jsou detekovány pouze elastické deformace,
- nevýhodou je omezení pouze na krystalické materiály (ať již kovové nebo nekovové – např. keramické),
- přesnost a spolehlivost měření klesá s rostoucími rozměry zrn a jejich přednostní orientací ve vyšetřovaném tělese; chyby měření – podle konkrétních podmínek – se pohybují od jednotek až do stovek Mpa,
- poměrně vysoké požadavky na přístrojové vybavení a odbornou úroveň pracovníků. [22]



Měření zbytkového napětí rentgenovou difrakcí (XRD) se spoléhá na základní interakce mezi čelem vlny rentgenového paprsku a krystalovou mřížkou. Vezměme si krystalický materiál tvořený mnoha krystaly, kde krystal může být definován jako pevná látka složená z atomů uspořádaných do periodického obrazce ve třech rozměrech. Tyto periodické roviny atomů mohou difrakcí způsobit konstruktivní anebo destruktivní interferenční vzorce. Povaha rušení závisí na meziplanetárním odstupu  $d$  a vlnové délce dopadajícího záření  $\lambda$ . [25]

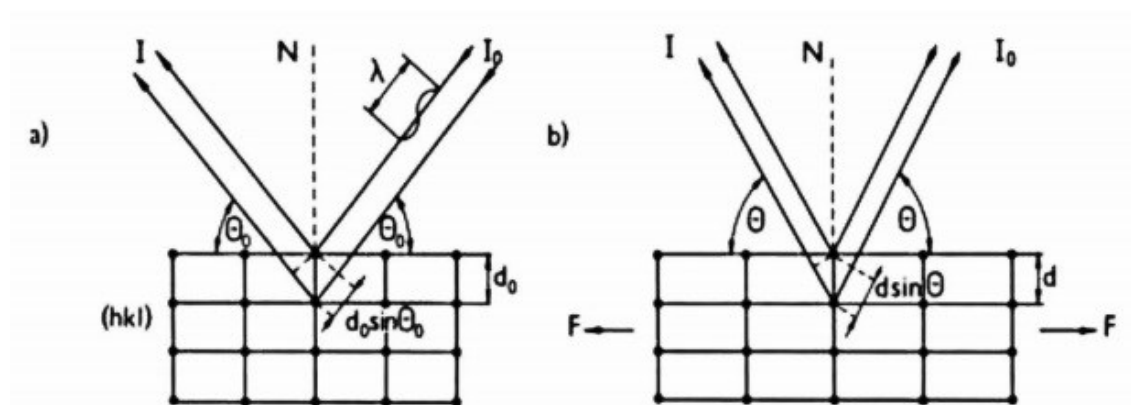
Toto je nyní běžně známé jako Braggův zákon a tvoří základní základ teorie rentgenové difrakce: [25]

$$n\lambda = 2d\sin(\theta), \quad (1)$$

Při známé hodnotě rentgenového záření  $\lambda$  a při experimentálně zjištěném Braggově úhlu  $\theta$  stanovit vzdálenost  $d$ , díky nimž lze vypočítat velikost napětí, jestliže je známa původní mřížková vzdálenost  $d_0$ . Velikost elastické deformace je daná poměrem: [22]

$$\epsilon = \frac{\Delta d}{d_0}, \quad (2)$$

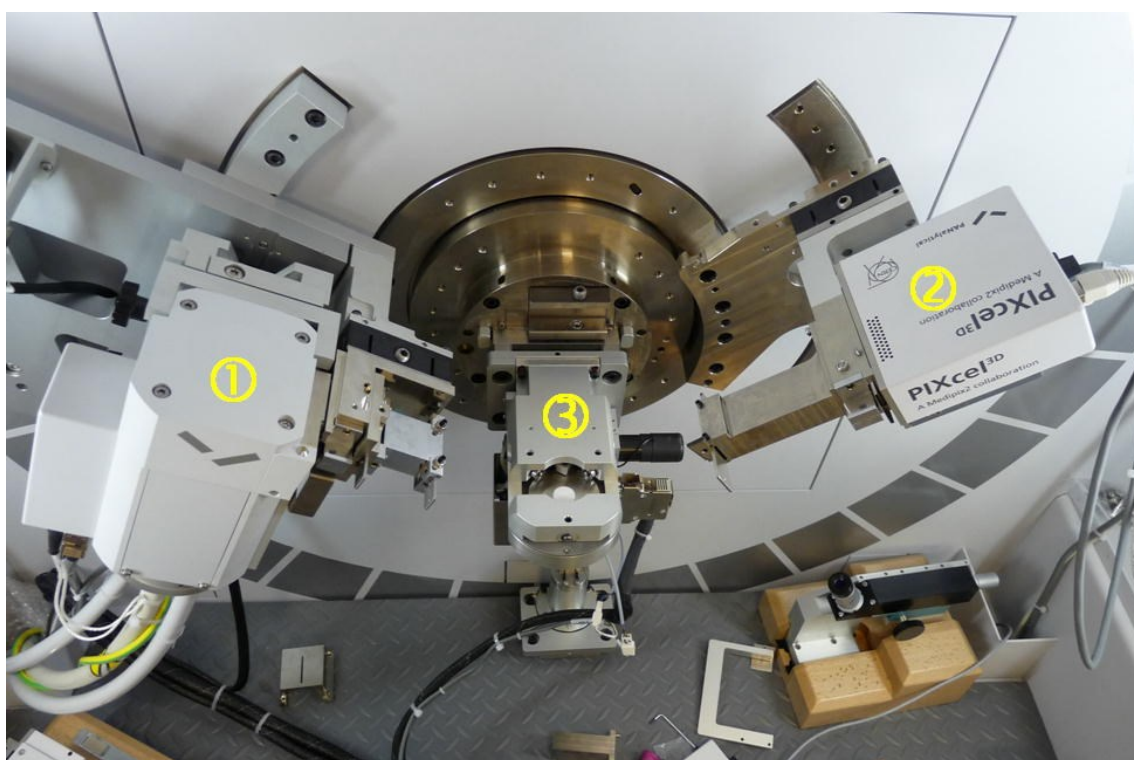
následně se dá určit odpovídající velikost napětí. U nezatížené mřížky, viz obr. 19a, je úhel dopadajícího svazku paprsků  $\theta_0$ , intenzitě  $I_0$  a vlnové délce  $\lambda$  odpovídající mezi-rovinné vzdálenosti  $d_0$ . V případě zatížení silou  $F$ , viz obr. 19b, se mřížka zdeformuje a v daném směru se mezirovinná vzdálenost  $d$  zvětší, přičemž zde dochází zároveň ke změně Braggova úhlu  $\theta$ . [25]



Obr. 19 – Změna Braggova úhlu při zatížení krystalické mřížky silou  $F$  [25]

Zasáhne-li svazek rtg. Paprsků atom, působí elektrické pole svazku na každý z elektronů atomů a urychluje jej; elektron pak vykonává kmitavý pohyb. Každý elektrický náboj, který

kmitá takovýmto způsobem, se stává zdrojem nového sledu elektromagnetických vln. Vlny vyzařované kmitajícími elektrony mají stejnou frekvenci a vlnovou délku jako dopadající svazek rtg. Paprsků, který vyvolal kmitání. Každý elektron bere jistou malou část energie z dopadajícího svazku a vysílá ji všemi směry, „rozptyluje“ ji. Superpozicí vln rozptýlených jednotlivými atomy vzniká difrakce. Vlny vyzařované od atomů krystalů se navzájem skládají tak, že se v jistých směrech od krystalu navzájem zesilují, v jiných směrech naopak vzájemně ruší; potom bude intenzita v každém směru záviset na tom, zdali se hřebeny vln od jednotlivých atomů superponují nebo nikoliv, tj. zdali jednotlivé vlny rozptýleného záření jsou nebo nejsou ve fázi. [11]



*Obr. 20 – Plochý vzorek v uspořádání na odraz (Bragg-Brentano geometrie) s rentgenovým zářením  $\text{CuK}\alpha$ . (1) Rentgenová lampa poskytující záření  $\text{CuK}\alpha$ ; (2) Detector PIXcel; (3) Držák s rotujícím plochým vzorkem. [26]*

## 4. Design of Experiments – DOE

Design of Experiments, lze přeložit jako metoda plánovaných experimentů, běžně se používá zkratka DOE. Jedná se o analytickou techniku, jejímž cílem je pomocí testování různých hodnot otestovat jakost systému nebo výrobek. Částečně se vlastně jedná o simulační metodu a existuje několik variant této metody (zejména klasický DOE, statistický DOE). Metoda DOE je velmi efektivní pro zvyšování jakosti produktu a také redukci nákladů, protože vychází z přístupů kvality. Je spojována s Geničim Tagučim. Přínosy využití metody jsou:

- snížení času a nákladů, návrh a testování výrobku nebo systému,
- zvýšení kvality výrobku nebo systému,
- snížení nákladů na pilotní sérii. [29]

Praktické využití metody DOE: Metoda se využívá pro testování složitých úloh, u kterých je konečný výsledek dán kombinací mnoha faktorů. Metoda DOE je tedy založena na testování kombinací různých hodnot (úrovní) faktorů, které mají vliv na kvalitu a pomocí ní se zúží počet testovaných kombinací na ty podstatné z hlediska celkové kvality. Metoda DOE tak výrazně redukuje nutný počet testů. [29]

Je doporučena standardy QS 9000 a ISO/TS 16949.

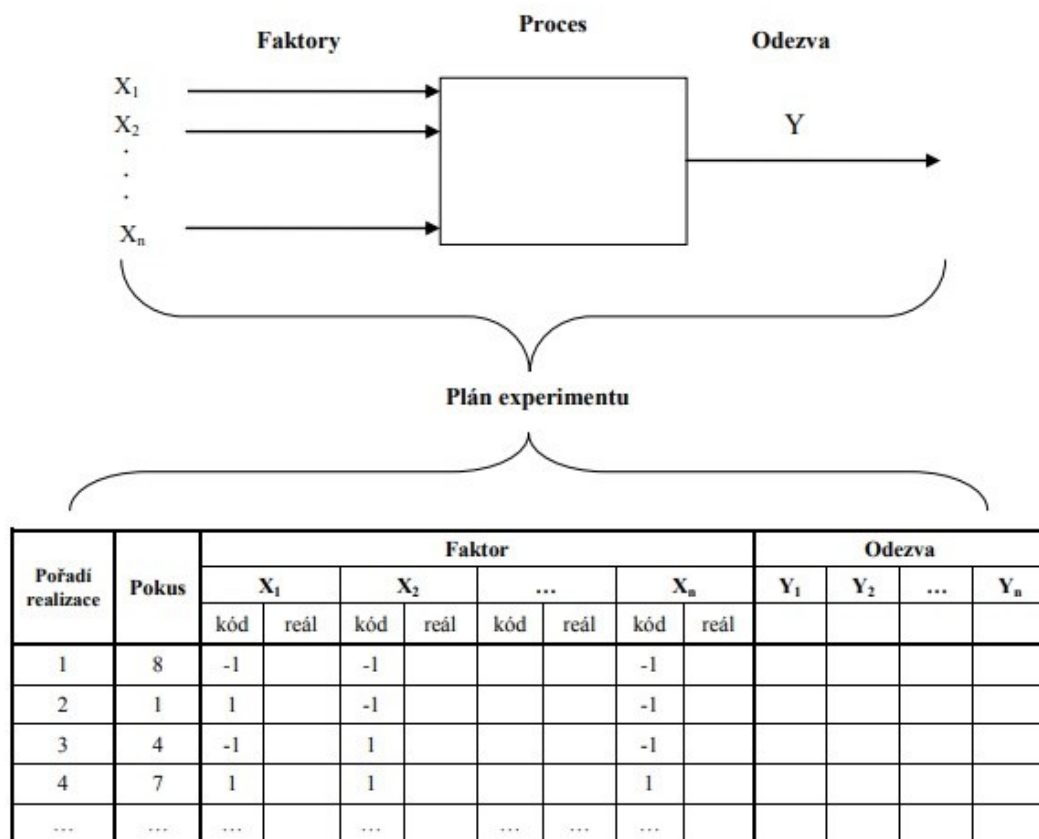
Nejvíce se využívá v oblasti výzkumu a vývoje v průběhu testování a validace nových výrobků či systémů. V průmyslové praxi se nejvíce uplatňuje varianta statistického DOE.

### Postup při provádění metody DOE:

- 1) Plánování experimentu
- 2) Navrhování experimentu
- 3) Realizace experimentu
- 4) Analýza experimentu
- 5) Ověřovací testy a vyhodnocení experimentu [28]

### Plán experimentu vždy zahrnuje:

- počet pokusů, ze kterých se experiment skládá,
- podmínky, za kterých se jednotlivé pokusy uskuteční (nastavení úrovní faktorů),
- pořadí pokusů (znáhodnění). [27]



Obr. 21 – Princip plánovaného experimentu DOE

Analýza experimentu zahrnuje:

- testování významnosti bloků (jsou-li bloky použity),
- určení efektů faktorů a jejich interakcí,
- vyhodnocení významnosti vlivu faktorů a jejich interakcí na charakteristiku kvality,
- určení optimálního nastavení úrovní významných faktorů vzhledem ke sledované charakteristice kvality. [27]

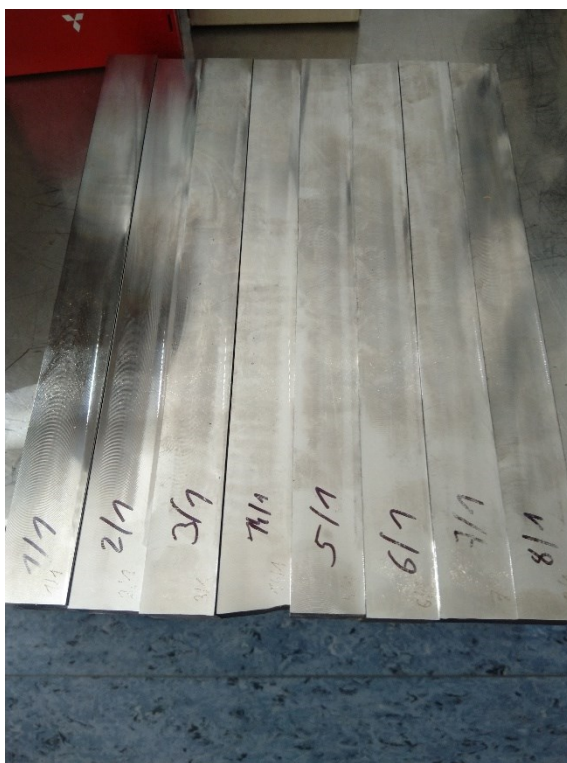
Analýza se provádí s využitím statistických a grafických metod. Pro výpočty je možné využít vhodný počítačový program zahrnující analýzu a grafické zpracování dat a matematické funkce – např. MS Excel nebo Statgraphics [27]

## 5. Návrh experimentální činnosti

Hlavním cílem experimentu diplomové práce bylo ověřit vlivy řezných parametrů na zbytková napětí a hodnoty drsnosti na obrobeném povrchu po frézování zakaleného nástrojového materiálu. Řezné podmínky byly voleny na maximální hranici stroje se snahou dosažení HSC parametrů. Veškeré obrábění bylo realizováno za sucha.

Pro experiment bylo použito osm vzorků zakaleného materiálu. Výchozím materiálem byla ocel 1.2842 (EN 90MnCrV8; 19 313) zakalená na tvrdost  $45 \pm 2$  HRC ( $194 \pm 3$  HB).

Na každý vzorek byly použity jiné řezné parametry. Jednotlivý vzorek byl opracován ze všech čtyř stran stejnými parametry. Načež první a třetí (protilehlá) plocha byla změřená na vyhodnocení drsností povrchu a vnitřního napětí, vždy na náběhové straně, na středu obrobené plochy a na výběhové straně, vždy na ose vzorku.



Obr. 22 – Vzorky materiálu oceli 19 313

## 5.1. Volba obráběného materiálu

Jako výchozí materiál pro tento experiment byla použita ocel 1.2842 (EN 90MnCrV8; 19 313) zakalená na tvrdost  $45 \pm 2$  HRC ( $194 \pm 3$  HB). Byly připraveny vzorky materiálu o rozměrech 30 x 30 x 300 mm.

Chemické složení oceli 1.2842							
Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	V
Obsah prvku [%]	0.87	1.95	0.25	0.016	0.009	0.30	0.086

Tab. 5 Chemické složení oceli 1.2842 [30]

Vlastnosti: Při správném zakalení v oleji drží svůj tvar a rozměry, ocel je houževnatá, dobře se obrábí. Špatná prokalitelnost při větších rozměrech. Problémy při kalení nástrojů složitějších tvarů a ostrých přechodů hran. [30]

Použití: Vodicí lišty, vyhazovače, nástroje – řezné, děrovací, lisovací, závitořezné, měřidla, razníky.

Teplot tváření: 1050-850 °C

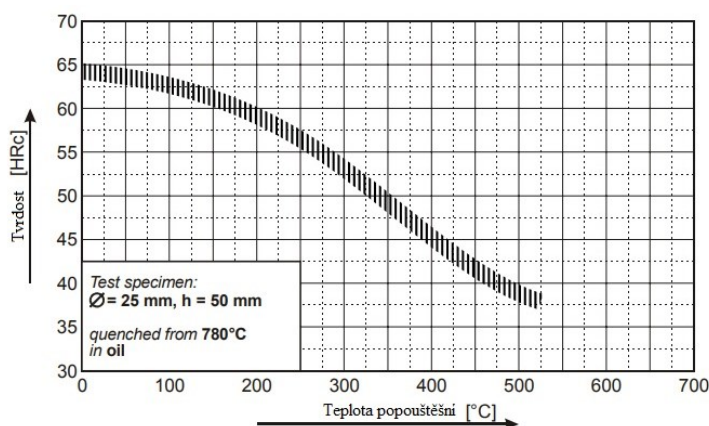
Žihání na měkko: 700-730 °C

Tvrdost v žíhaném stavu: 220 HB ca 770 Mpa

Kalení 780-820 °C – olej, teplá lázeň 400 °C

Optimální popouštěcí teplota 150-250 °C

Tvrdost po zušlechtění až 62-58 HRC [30]



Obr. 23 – Popouštěcí diagram oceli 1.2842 [30]



## 5.2. Volba obráběcího stroje

Volba vhodného stroje byla poněkud komplikovanější. Jelikož jsme chtěli experiment provést na konvenčních strojích a zároveň se pokusit o HSC obrábění, bylo třeba najít vhodný stroj s vysokým posuvem a dostatečnými otáčkami. Ve společnosti Freso comp. s.r.o., ve které pracuji takový stroj nebyl, takže jsme se rozhodli vzorky opracovat na strojích univerzity VŠB-TU Ostrava. Během přípravy vzorku však nastal nouzový stav na celém území ČR, který zamezil přístup do všech škol. Tím jsme byli nuceni opět přehodnotit možnosti a vrátili jsme se zpět do společnosti Freso comp. s.r.o., kde jsme nakonec vybrali nejvhodnější stroj pro opracování vzorků.

Vybraný stroj byla konzolová frézka FGV 32. Tato frézka se aspoň trochu dokáže přiblížit řezným parametrům pro HSC obrábění. Vzorky byly upínány mechanicky do svěráku na pracovním stole stroje.



*Obr. 24 – Frézka FGV 32, mechanický svěrák s upnutým vzorkem, mechanický svěrák s plexisklem pro uchycení fotoaparátu*

Obrábění každého vzorku bylo zaznamenáno fotoaparátem na mobilním telefonu, který byl uložen na pracovní stůl stroje do druhého svěráku a byl chráněn plexisklem. Účelem pořizování foto a video podkladů bylo vyhodnocení daných řezných parametrů z hlediska dosažení efektu HSC obrábění. Hodnocení probíhalo posouzením barvy třísky v místě řezu. Náplní diplomové práce nebylo měření teploty během obrábění.

Frézka FGV 32 je vysoce výkonná produkční frézka se svislým vřetenem. Vřeteno je uloženo v naklápěcí vřetenové hlavě s výsuvnou pinolou. Stroj je určen pro široký rozsah frézovacích a vrtacích operací na obrobcích do hmotnosti 250 kg, a to v kusové i sériové výrobě. Rozsah otáček vřetena a pracovních posuvů umožňuje hospodárné obrábění nejrozumnějších druhů materiálů nástroji z rychlořezných ocelí i slinutých karbidů. [31]

#### Základní parametry FGV 32

- podélný stůl o rozměrech 360 × 1400 mm,
- vřeteno s kuželem ISO 50,
- základní řada otáček vřetene 31,5 – 1400 ot.min<sup>-1</sup>,
- strojní posuvy X, Y, Z (plynule stavitelné posuvy),
- ruční kola na osách X, Y a Z s odměřovacími číselníky s dělením 0,02 mm,
- pohony pro připojení zvláštního příslušenství,
- sousledné frézování v podélné ose,
- elektrovýzbroj pro napětí 400 V/50 Hz. [31]

### **5.3. Volba nástroje a materiálu řezné části**

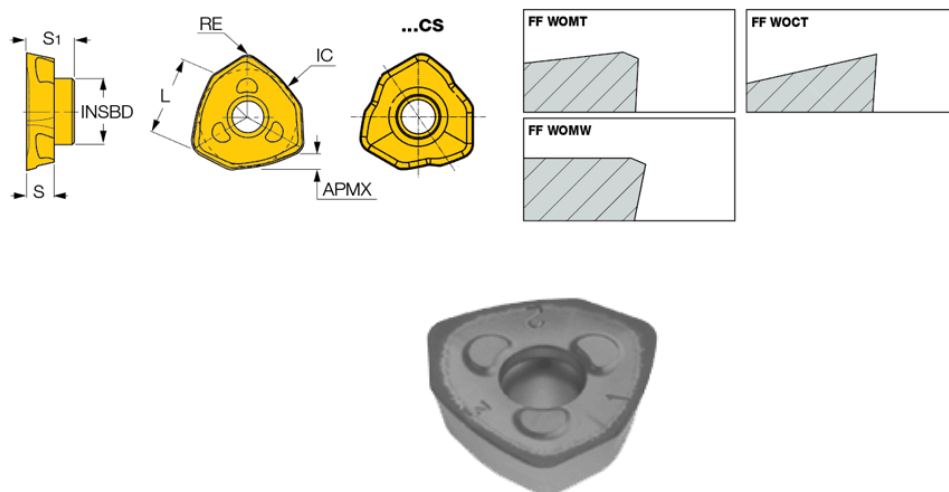
Ve firmě nedisponujeme nástroji pro HSC obrábění, proto bylo třeba nástroj zapůjčit. Po konzultaci byla jako nejvhodnější vybrána pětizubá fréza FF FW D50-22-06-C, která by měla dané řezné podmínky zvládnout. Fréza byla vypůjčena z VŠB-TU Ostrava.



*Obr. 25 – Fréza FF FW D50-22-06-C a její parametry [32]*



Na frézu byla upnuto pět vyměnitelných břitových destiček Iscar FF WOCT 060212T z materiálu IC928, což je houževnatý karbid s PVD TiAlN povlakem. Vhodný pro frézování nerez ocelí, žárupevných slitin a jiných slitin oceli (P20-P40; M25-M35; S15-S30). Doporučuje se pro přerušovaný řez a těžké operace. [32]



Obr. 26 – Břitová destička FF WOCT 060212T [32]

## 5.4. Volba řezných podmínek

Výrobce udává následující doporučené hodnoty:

řezná rychlost  $v_c = 90\text{--}350 \text{ m.min}^{-1}$ ;

posuv na zub  $f_z = 0,3\text{--}1,00 \text{ mm}$ ;

hloubka řezu  $a_p = 1,00\text{--}1,50 \text{ mm}$ .

V experimentu byly zvoleny řezné podmínky pomocí metody DOE viz tabulka 6. Původně byly zamýšleny vyšší hodnoty a rozdíly řezných parametrů z důvodu výkonu stroje a proveditelnosti experimentu. Byli jsme limitováni maximálními otáčkami a to 1400 otáček a maximálním lineárním posuvem  $900 \text{ mm. Min}^{-1}$ . Veškeré obrábění bylo provedeno bez použití chladících médií. Řezné podmínky byly voleny s ohledem na stroj a zároveň tak, aby se mohly projevit prvky HSC obrábění.

	<b>-1</b>	<b>1</b>
<b>x<sub>1</sub> posuv na zub [mm]</b>	0,1	0,13
<b>x<sub>2</sub> řezná rychlost [m.min<sup>-1</sup>]</b>	157	220
<b>x<sub>3</sub> hloubka řezu [mm]</b>	1	1,5

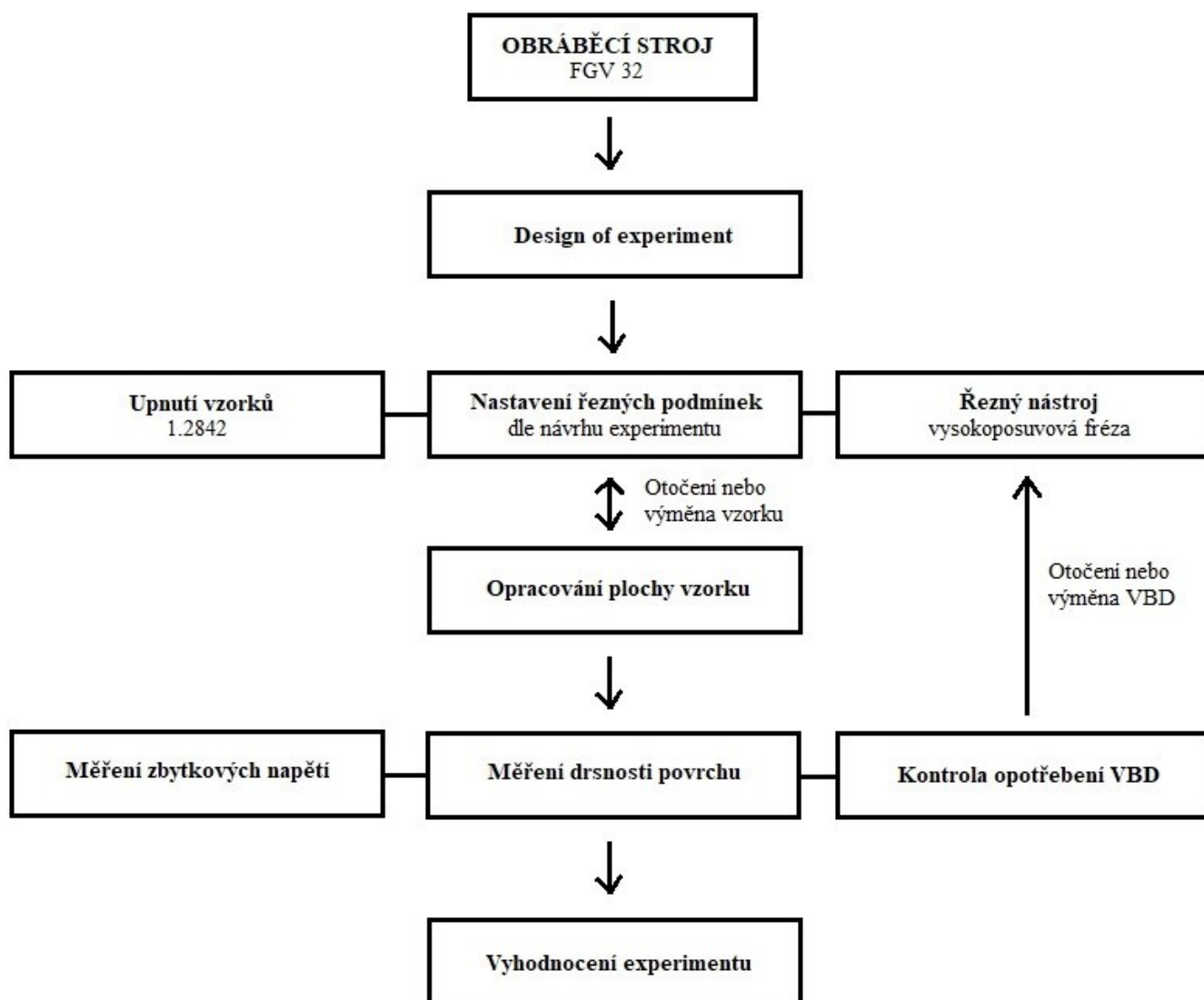
*Tab. 6 – Návrh matice experimentu*

Konečné podoba parametrů je uvedena v tabulce 7. V přepočtech na otáčky a lineární posuv se v některých případech jedná o maximální možné parametry stroje.

	<b>X<sub>1</sub></b>	<b>x<sub>2</sub></b>	<b>x<sub>3</sub></b>	<b>posuv na zub f<sub>z</sub> [mm]</b>	<b>řezná rychlost v<sub>c</sub> [m.min<sup>-1</sup>]</b>	<b>hloubka řezu a<sub>p</sub> [mm]</b>
<b>1.</b>	-1	-1	-1	0,1	157	1
<b>2.</b>	-1	-1	1	0,1	157	1,5
<b>3.</b>	-1	1	-1	0,1	220	1
<b>14.</b>	-1	1	1	0,1	220	1,5
<b>5.</b>	1	-1	-1	0,13	157	1
<b>6.</b>	1	-1	1	0,13	157	1,5
<b>7.</b>	1	1	-1	0,13	220	1
<b>8.</b>	1	1	1	0,13	220	1,5

*Tab. 7 – Zvolené řezné parametry experimentu*

## 5.5. Schéma experimentu



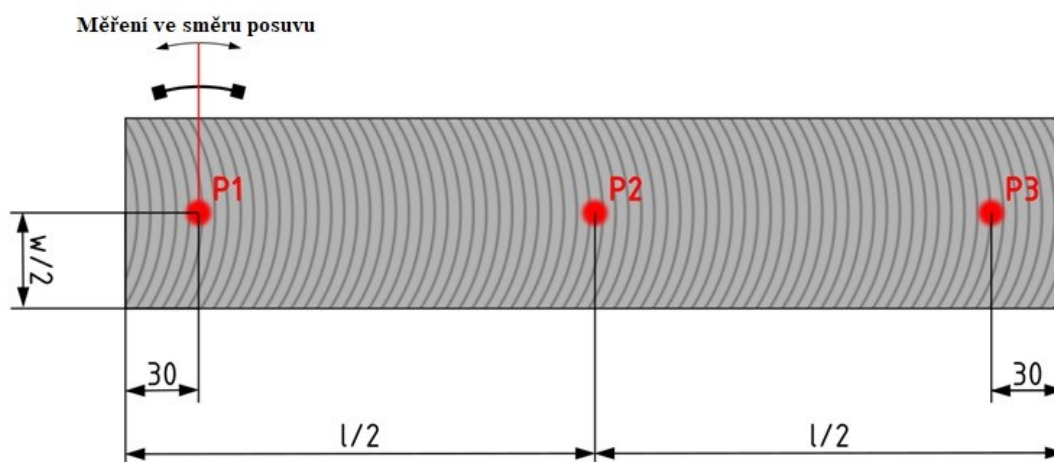
Obr. 27 – Schéma experimentu

## 5.6. Metody měření a měřicí přístroje

Před opracováním vzorků byla přeměřena drsnost povrchů zakalených tyčí. Po obrábění proběhlo měření drsnosti obrobeného povrchu na každé straně zkušební tyče, a to vždy na vstupu, ve středu a na výstupu obrobené plochy. Použit byl optický mikroskop Alicona infinite focus G5. Měření proběhlo na pracovišti Žilinské univerzity.

Podpovrchových napětí byla měřena metodou rentgenografickou. Měření proběhla opět na pracovišti Žilinské univerzity na rentgenovém difraktometru Proto XRD. Měření byla provedena na všech vzorcích a to tak, jak již bylo psáno dříve v kapitole č. 5 „Návrh experimentální činnosti“.

Celkem proběhlo měření ve 48 bodech jak pro zbytková napětí, tak i drsnost povrchu.



Obr. 28 – Parametry bodů měření

Opotřebení břitů nebylo měřeno. Kontrola probíhala vždy jen opticky. Jestliže bylo zjištěno opotřebení nebo poškození byla provedena výměna nebo otočení destičky.

### 5.6.1. Měření drsnosti povrchu

Drsnost obrobeného povrchu byla hodnocena v souladu s ČSN EN ISO 4287. Měření byly vybrané parametry drsnosti povrchu, které jsou v praxi nejvíce využívány. Jedná se o parametry:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$

Drsnost povrchu byla měřena metodou měření optickým mikroskopem Alicona infinite focus G5. InfiniteFocus je vysoce přesný, rychlý a flexibilní optický 3D měřicí systém. Pouze s jedním senzorem uživatelé ověřují rozměrovou přesnost a měří drsnost povrchu svých součástí. Na základě technologie Focus Variation je rozsah měřitelných povrchů téměř neomezený. Sondou Vertical Focus Probing, která je rozšířením Focus-Variation, jsou vertikální povrchy testovány také laterálně. Komponenty jsou sledovatelné s vysokou přesností, s vysokým svislým rozlišením a vysokou opakovatelností. Robustní princip měření Focus-Variation v kombinaci s hardwarem izolujícím vibrace umožňuje měření tvaru a drsnosti i velkých a těžkých součástí. Všechny osy InfiniteFocus jsou vybaveny vysoce přesnými kodéry zajišťujícími přesný pohyb stolku. S automatizačním rozhraním je InfiniteFocus také použit pro plně automatická měření také ve výrobě. [35]

#### Základní vlastnosti optického mikroskopu Alicona infinite focus G5:

- Pracovní zvětšení 20x
- Pracovní vzdálenost 19 mm
- Vertikální rozlišení 50 nm
- Přesnost výškového kroku 0,05 mm
- Maximální měřitelná oblast volitelná 10000-24780 mm<sup>2</sup>
- Minimální měřitelná drsnost  $R_a$  0,15 μm [35]



Obr. 29 – Optický mikroskop Alicona infinite focus G5 [35]

## 5.6.2. Měření zbytkových napětí

Rentgenografická metoda měření byla zvolena jako nejlepší pro náš experiment. Tato metoda měření je popsána v kapitole 3.4.3. Měření byla prováděna v laboratořích Žilinské univerzity, která jsou vybavena inteligentním systémem pro nedestruktivní technologie měření X– ray difraktometrem Proto iXRD. Měření zbytkových napětí bylo měřeno, s ohledem na použitou lampu (Cr-K $\alpha$ ), v hloubce cca. 10-12 $\mu$ m.

Parametry	
<i>Materiál:</i> STEEL (Cr_K $\alpha$ ) (BCC, hkl-211)	<i>Jednotky:</i> Mpa
<i>Záření:</i> Cr K $\alpha$	<i>Bragg Angle:</i> 156.41
<i>Vlnové délky:</i> 2.291	<i>Peak Location:</i> Gaussian 80%
<i>Napětí:</i> 20 kV; proud: 4 mA	<i>Gain Correction:</i> P/G(s)
<i>Beta Osc:</i> 3.00; <i>Phi Osc:</i> 0.00; <i>X Osc:</i> 0.00; <i>Y Osc:</i> 0.00;	<i>PeakShift:</i> Absolute Peak

Tab. 8 – Parametry při měření difraktometrem Proto iXRD



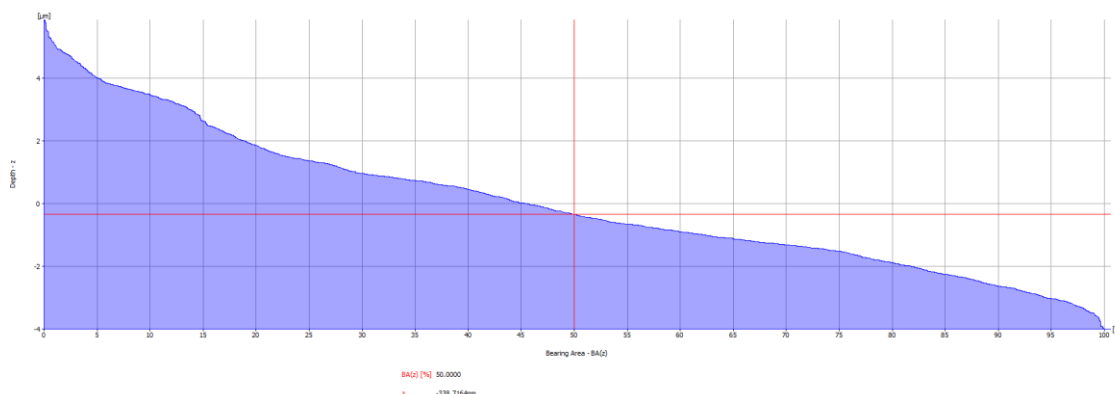
Obr. 30 – Sestava difraktometru Proto iXRD

## 6. Vyhodnocení výsledků experimentu

Experimentem jsme chtěli zjistit jaký vliv mají řezné parametry na integritu povrchu, konkrétně drsnost povrchu a zbytková napětí. Vzorkové tyče byly opracovány ze všech čtyř stran a následně byly proměřeny dvě strany a to strana č.1 a protilehlá strana č.3. Vzorek č. 4 měl na konci plochy zářez z pily, proto byl zaměněn za vzorek č. 14. V místě zářezu by mohly vzniknout vibrace a ovlivnit tím experiment. Naměřené hodnoty byly zaznamenány a zpracovány a byly vytvořeny tabulky a grafy pro jednotlivé vzorky.

### 6.1. Výsledky drsnosti povrchu

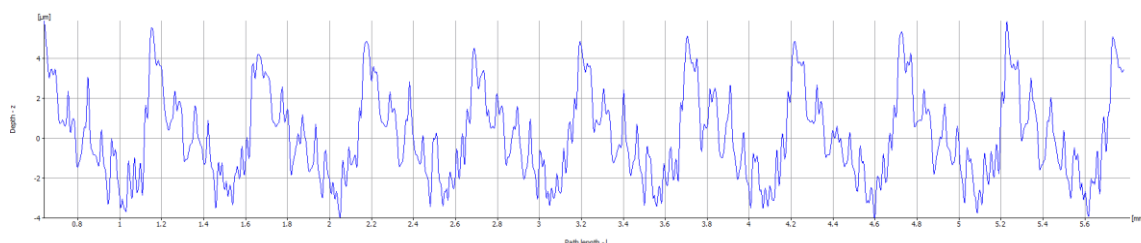
Drsnost povrchu byla změřena vždy u všech vzorku ve třech bodech na první a třetí (protilehlé) ploše, jak je představeno v návrhu experimentu. Všechny body měření byly na všech vzorcích a jejich plochách voleny v ose ve vzdálenosti 30 mm od konců. Další (třetí) měřicí bod na každé ploše se nacházel uprostřed plochy. Při každém měření byl vystaven protokol o měření s profilem plochy. Z měřených hodnot byly vybrány parametry  $R_a$ ,  $R_q$  a  $R_z$ , které byly sepsány do tabulek, z nichž byly vloženy do sloupcových a bodových grafů viz níže. Následně proběhlo vyhodnocení naměřených hodnot. V práci je zobrazen měřicí protokol pro názornost na obrázcích 31 a 32 a tabulkách 9 a 10. Kompletní protokoly měření jsou uvedeny v přílohách práce.



Obr. 31 – FAC parametry měření

Rk	5,5	μm	Core roughness depth, Height of the core material
Rpk	2,73	μm	Reduced peak height, mean height of the peaks above the core material
Rvk	674.9034	nm	Reduced valley height, mean depth of the valleys below the core material
Rmr1	14.7500	%	Peak 48ateriál component, the fraction of the surface which consists of peaks above the core material
Rmr2	93.9700	%	Peak 48ateriál component, the fraction of the surface which will carry the load
l	6,48	mm	Profile Length
Lc	800.0000	μm	LambdaC: cut off wavelength

Tab. 9 – FAC parametry měření



Obr. 32 – Profil měřeného vzorku

Name	Value	[u]	Description
Ra	1,32	μm	Average roughness of profile
Rq	2,1658	μm	Root-Mean-Square roughness of profile
Rt	9,21	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile
Rz	9,1855	μm	Mean peak to valley height of roughness profile
Rmax	9,61	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
Rp	5,51	μm	Maximum peak height of roughness profile
Rv	3,69	μm	Maximum valley height of roughness profile
Rc	5,42	μm	Mean height of profile irregularities of roughness profile
Rsm	233,6029	μm	Mean spacing of profile irregularities of roughness profile
Rsk	0,5597		Skewness of roughness profile
Rku	2,91		Kurtosis of roughness profile
Rdq	0,1336		Root-Mean-Square slope of roughness profile
Rt/Rz	1,0737		Extreme Scratch/Peak value of roughness profile, ( $\geq 1$ ), higher values represent larger scratches/peaks
l	6,48	mm	Profile Length
Lc	800,000	μm	LambdaC: cut off wavelength

Tab. 10 – Parametry měření drsnosti povrchu vzorku



Vzorek	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]
1-1 Z	1,3500	2,8600	11,2300
1-1 S	1,4500	1,1600	8,1900
1-1 K	1,3200	2,1658	9,1855
2-1 Z	1,0000	1,4800	6,1479
2-1 S	1,4500	1,7400	7,4000
2-1 K	1,0128	1,0800	6,1524
3-1 Z	1,0811	1,4500	5,4100
3-1 S	0,3843	0,4878	2,0700
3-1 K	0,2746	0,3423	1,1000
14-1 Z	1,3900	1,8000	6,9500
14-1 S	1,8100	1,4500	6,5500
14-1 K	1,1005	1,2100	5,1210
5-1 Z	1,1294	1,6700	5,3700
5-1 S	1,6800	2,0427	7,8900
5-1 K	1,1300	1,8600	7,2900
6-1 Z	1,7200	2,7500	9,8300
6-1 S	1,7600	2,0406	7,7000
6-1 K	1,0600	1,5800	8,1214
7-1 Z	1,9900	1,0200	6,0060
7-1 S	1,0092	1,9100	5,5200
7-1 K	1,0654	1,3600	5,6900
8-1 Z	1,8900	1,2500	6,4900
8-1 S	1,2900	1,4000	6,0396
8-1 K	1,4100	1,4100	7,0200

Vzorek	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]
1-3 Z	1,1832	1,8400	8,7900
1-3 S	1,6900	1,7500	8,0096
1-3 K	1,7200	2,0700	9,8800
2-3 Z	1,2700	1,7600	6,0468
2-3 S	0,9505	1,1289	4,1195
2-3 K	1,3800	1,6500	6,9200
3-3 Z	0,3321	0,4053	1,3200
3-3 S	0,4165	0,5132	2,2900
3-3 K	0,3321	0,4053	1,3200
14-3 Z	1,1087	1,4600	5,8100
14-3 S	0,3415	0,4172	1,5200
14-3 K	0,4622	0,5594	2,4600
5-3 Z	0,4664	0,5882	2,5900
5-3 S	1,4200	2,3700	9,0188
5-3 K	2,0843	2,9200	9,4600
6-3 Z	0,9586	1,8600	5,0860
6-3 S	0,4516	0,5615	2,1800
6-3 K	1,9100	1,4800	6,5700
7-3 Z	1,1200	1,5000	6,1150
7-3 S	1,1000	1,1000	6,2900
7-3 K	0,4252	0,5328	2,8200
8-3 Z	1,7700	1,0200	6,0800
8-3 S	1,5900	1,2300	6,0729
8-3 K	0,9913	1,8200	5,3200

Tab. 11 – Naměřené hodnoty drsnosti povrchu na vzorcích experimentu

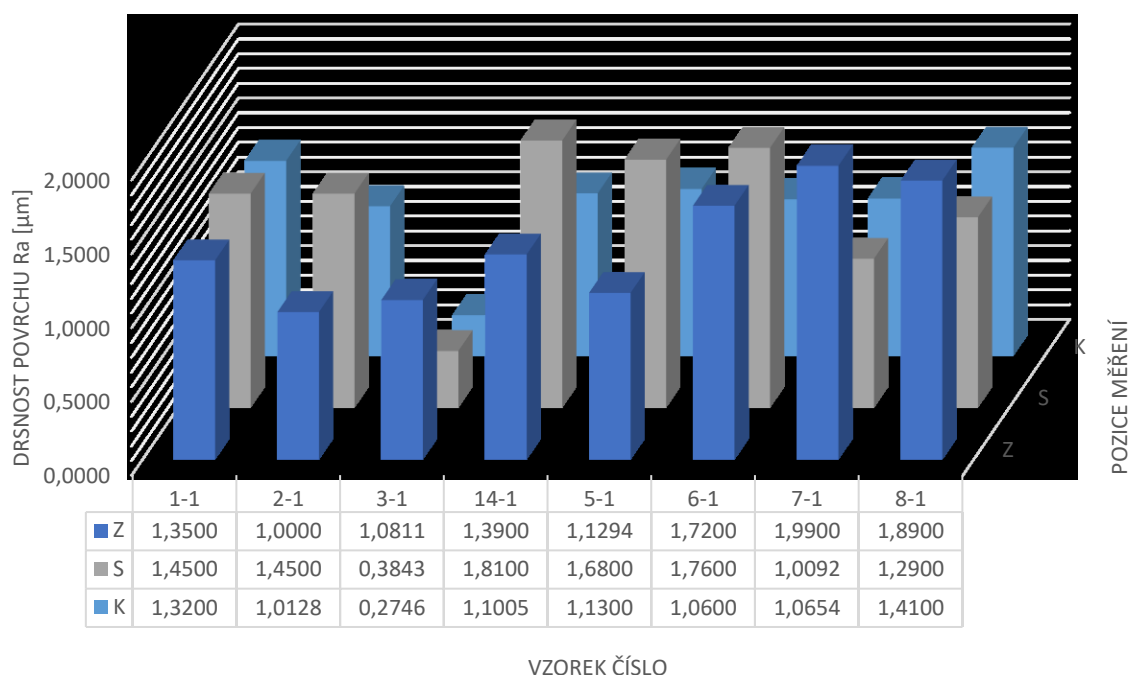
Pro lepší přehled je na dalších stranách tabulka 11 převedena do čtyř grafů. První graf ukazuje parametr Ra [ $\mu\text{m}$ ] na všech 8 vzorcích opracovaných na první obráběné ploše. Dále je rozdělen do tří řad, které určují místo měření vzorku, přičemž první řada „Z“ znamená začátek vzorku, „S“ znamená střed vzorku a „K“ konec vzorku. Toto označení je dále použito ve všech grafech a tabulkách.

Druhý graf je totožný s tím prvním, akorát místo první opracované plochy se jedná o třetí opracovanou plochu vždy na stejném vzorku se stejnými parametry obrábění.

Třetí graf znázorňuje opět všech 8 vzorků s třemi místy měření na první opracované ploše, ale danou měřenou hodnotou je nyní parametr Rz [ $\mu\text{m}$ ].

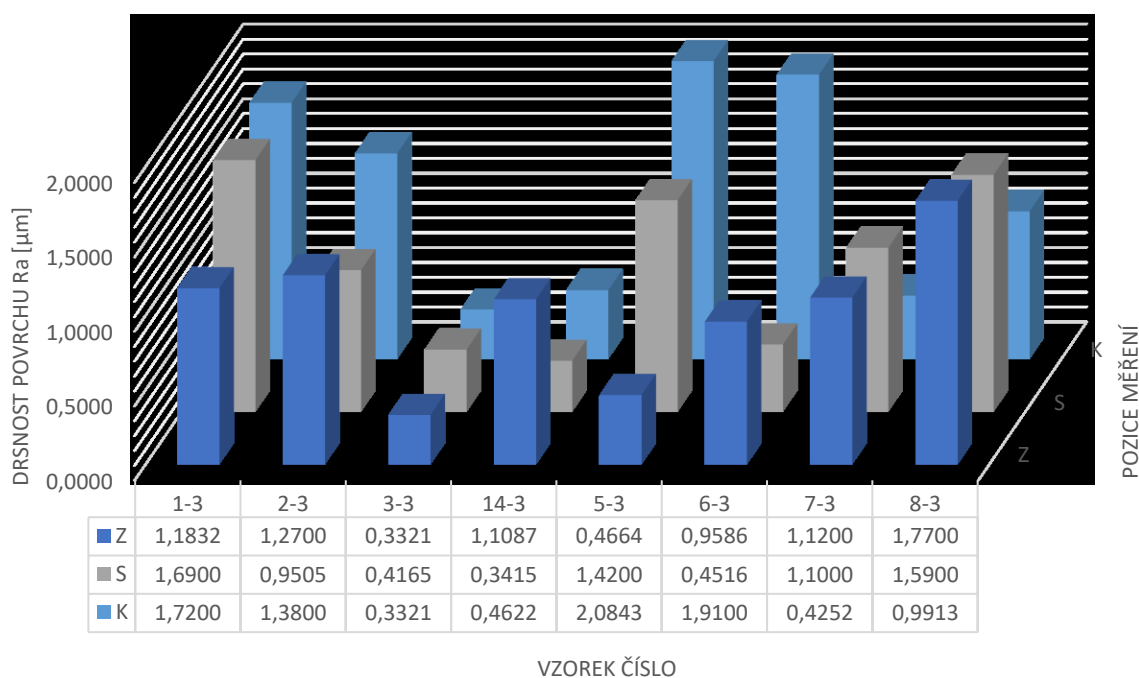
Čtvrtý graf znova parametr Rz [ $\mu\text{m}$ ] naměřený na třetí opracované ploše vzorků.

## Hodnota Ra na první opracované ploše



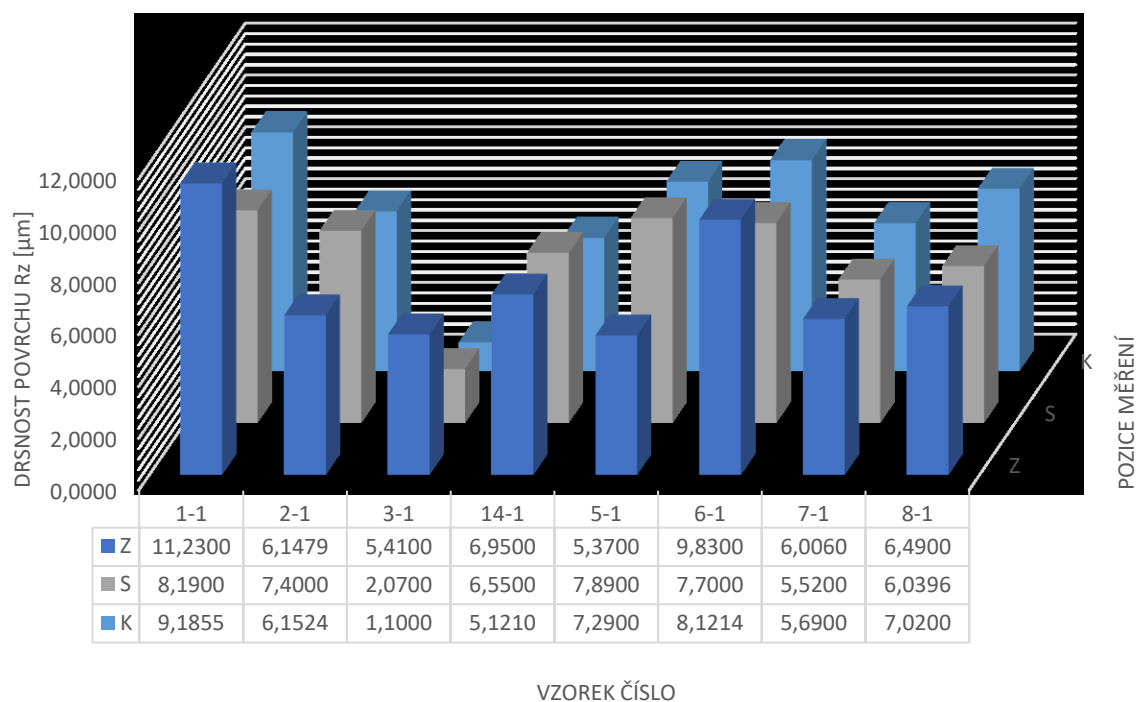
Graf 1 – Parametr Ra na první opracované ploše experimentálních vzorků

## Hodnota Ra na třetí opracované ploše



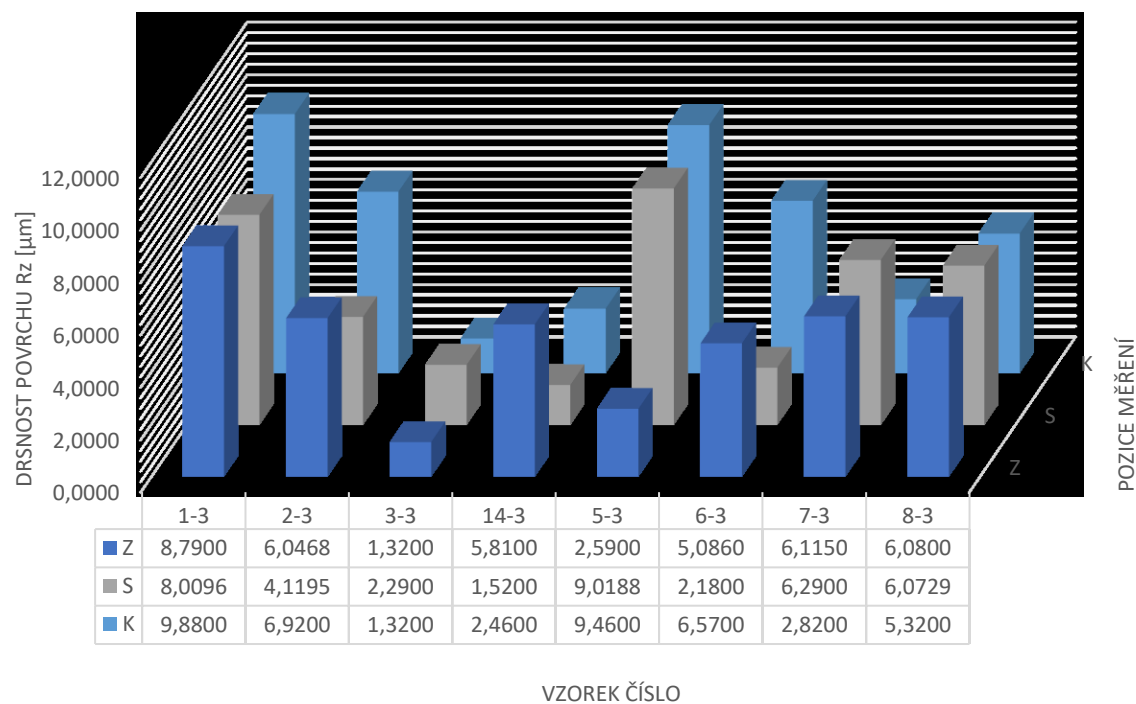
Graf 2 – Parametr Ra na třetí opracované ploše experimentálních vzorků

## Hodnota Rz na první opracované ploše



Graf 3 – Parametr Rz na první opracované ploše experimentálních vzorků

## Hodnota Rz na třetí opracované ploše



Graf 4 – Parametr Rz na třetí opracované ploše experimentálních vzorků

Již na první pohled se dá vyčíst pár informací, které jsou potvrzeny v grafech na dalších stranách. Jako první byl zkoumán vliv řezné rychlosti na parametr Ra ve všech třech pozicích měření. Pro přesné srovnání je porovnáván vzorek č. 1 s vzorkem č. 3, vzorek č. 2 se vzorkem č. 4, vzorek č. 5 se vzorkem č. 7 a vzorek č. 6 se vzorkem č. 8. Důvodem je, že dané vzorky mají stejný posuv na zub i stejnou hloubku řezu, pouze právě řezná rychlost je rozdílná. Graf 5 zobrazuje naměřené hodnoty na pozici Z, graf 6 hodnoty na pozici S a graf 7 hodnoty na pozici K.

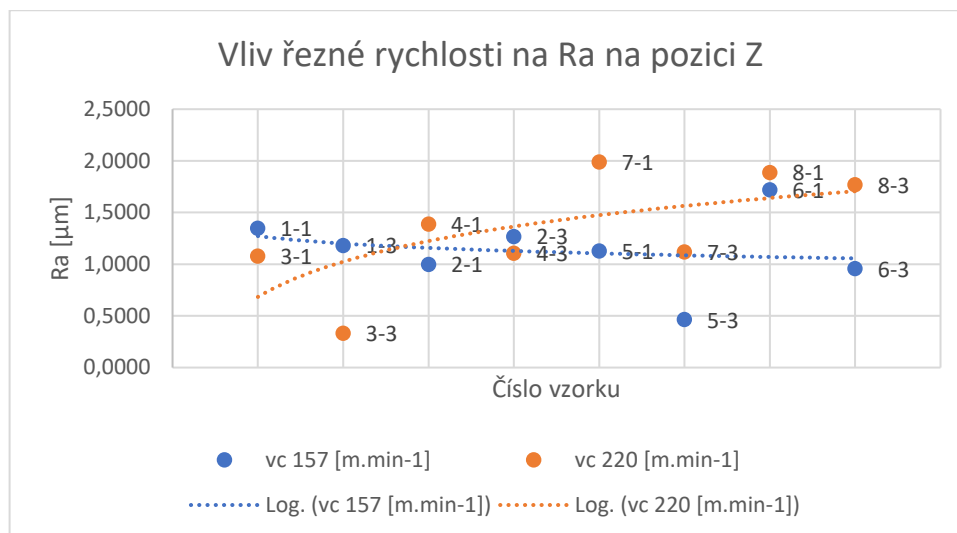
Z těchto grafů lze říct, že vyšší řezná rychlost má vliv na drsnost povrchu. Na pozici Z toto tvrzení není tak patrné a hodnoty měření jsou spíše srovnatelné. Avšak na pozici S, a hlavně na pozici K je již značně zřetelné, že při vyšší řezné rychlosti se zlepšila hodnota drsnosti povrchu parametru Ra. Rovněž lze říct, že ještě větší vliv řezné rychlosti na drsnost povrchu byl u prvních čtyřech vzorků, kde byl zároveň menší posuv na zub. Nejlepší drsnost povrchu má vzorek č. 3 a to z důvodu maximální řezné rychlosti stroje, nižšího posuvu na zub a menší hloubky řezu. Menší zhoršení má vzorek č. 4, který měl větší hloubku řezu. Naopak jako nejhorší vyšly vzorky č. 5 a č. 6. U těchto vzorků byly použity nižší řezná rychlost a vyšší posuv na zub.

Lepší drsnosti povrchu je možno docílit snížením posuvu na zub a hloubkou řezu. Rovněž a zároveň největším faktorem, kterým bychom docílili lepší drsnosti povrchu, je zvýšení řezné rychlosti. To však nebylo na požitém stroji možné, jelikož byly použity největší možné otáčky stroje. Otáčky stroje ovlivňují řeznou rychlost.

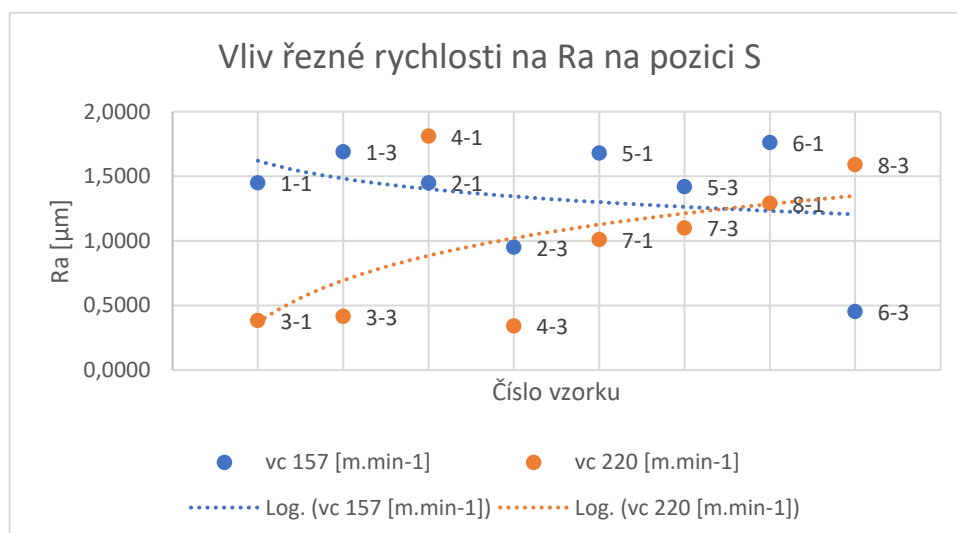
$$v_c = \frac{D \times \pi \times n}{1000} \text{ [m.min}^{-1}\text{]} \quad (3)$$

Kde:  $v_c$  – řezná rychlost  
 $D$  – průměr nástroje  
 $n$  – otáčky vřetene

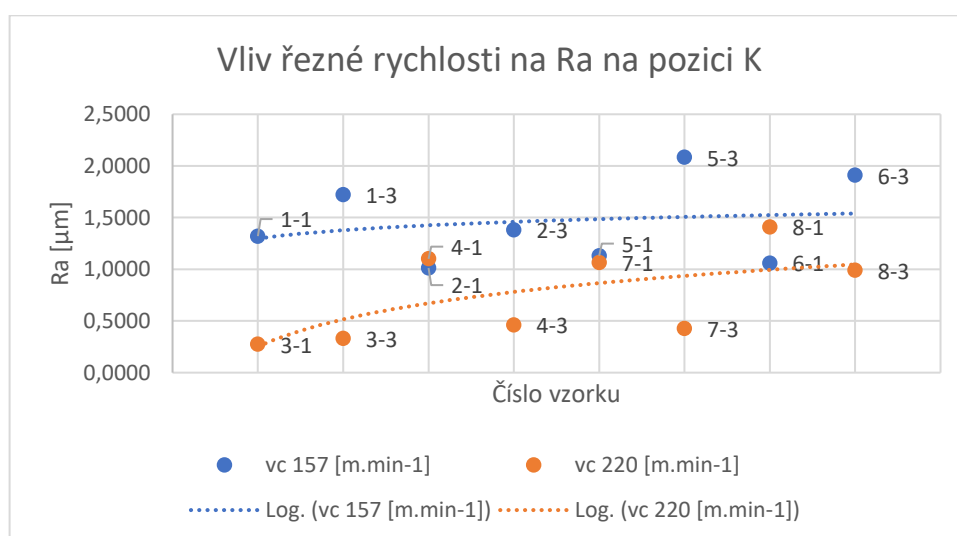
Následující grafy 8, 9 a 10 zobrazují stejné parametry jen pro parametr Rz. Výsledek je velice podobný jako u hodnot parametru Ra.



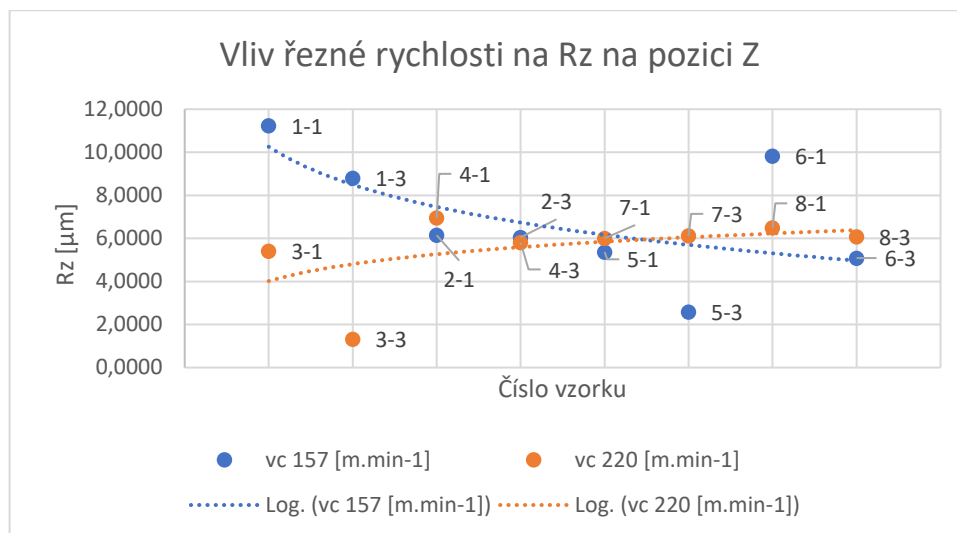
*Graf 5 – Vliv řezné rychlosti na Ra na pozici Z*



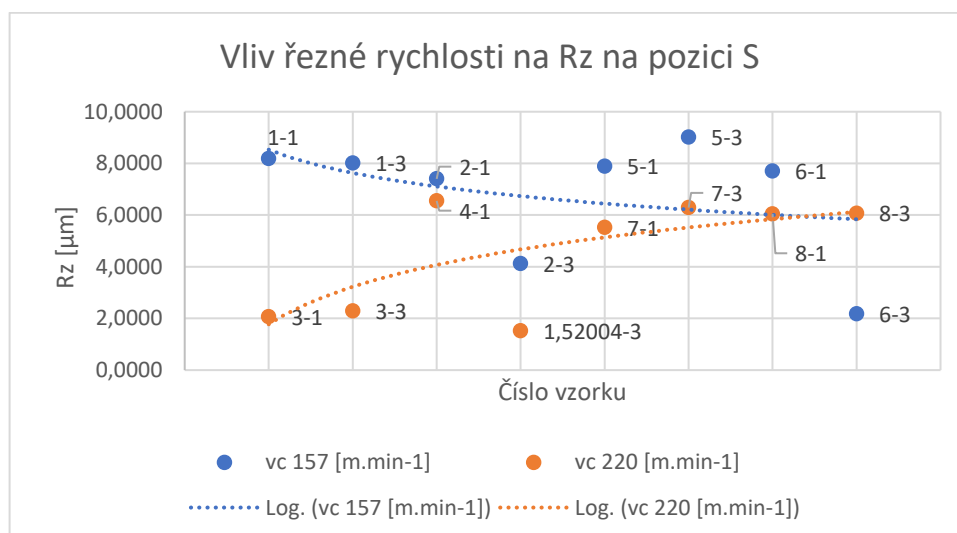
*Graf 6 – Vliv řezné rychlosti na Ra na pozici S*



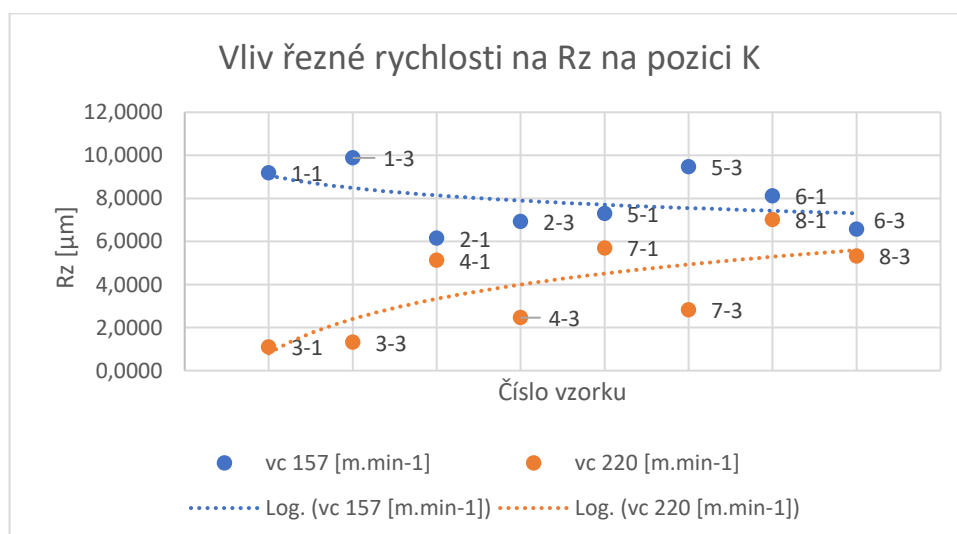
*Graf 7 – Vliv řezné rychlosti na Ra na pozici K*



Graf 8 – Vliv řezné rychlosti na Rz na pozici Z



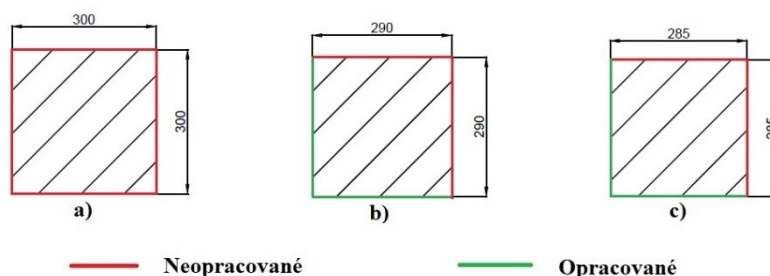
Graf 9 – Vliv řezné rychlosti na Rz na pozici S



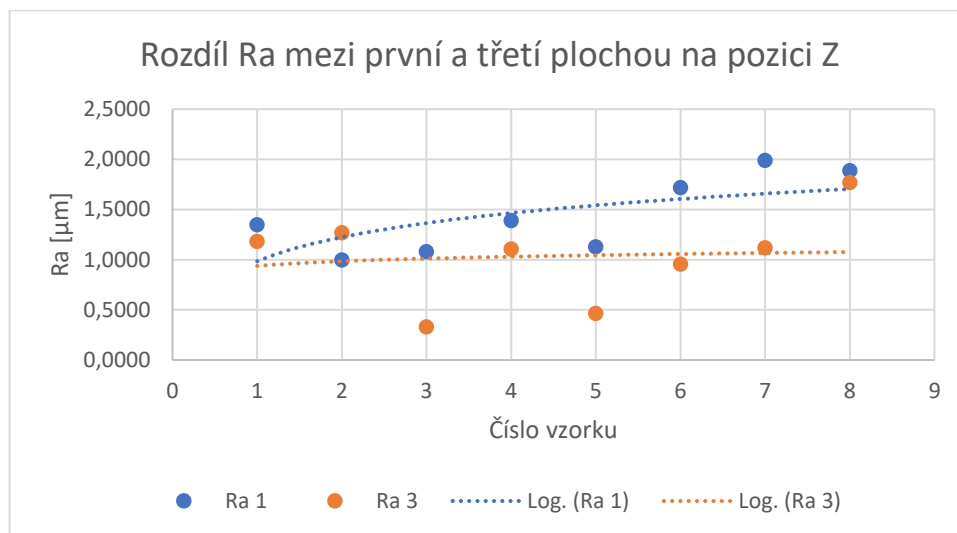
Graf 10 – Vliv řezné rychlosti na Rz na pozici K

Vzorky se opracovávaly ze všech čtyř stran pro porovnání, jak se budou lišit naměřené hodnoty při použití stejných řezných podmínek. Toto porovnání je graficky znázorněno na následujících šesti grafech. První tři jsou opět pro parametr  $R_a$ , přičemž po jednom ke každé pozici měření. Další tři pak stejně pro parametr  $R_z$ .

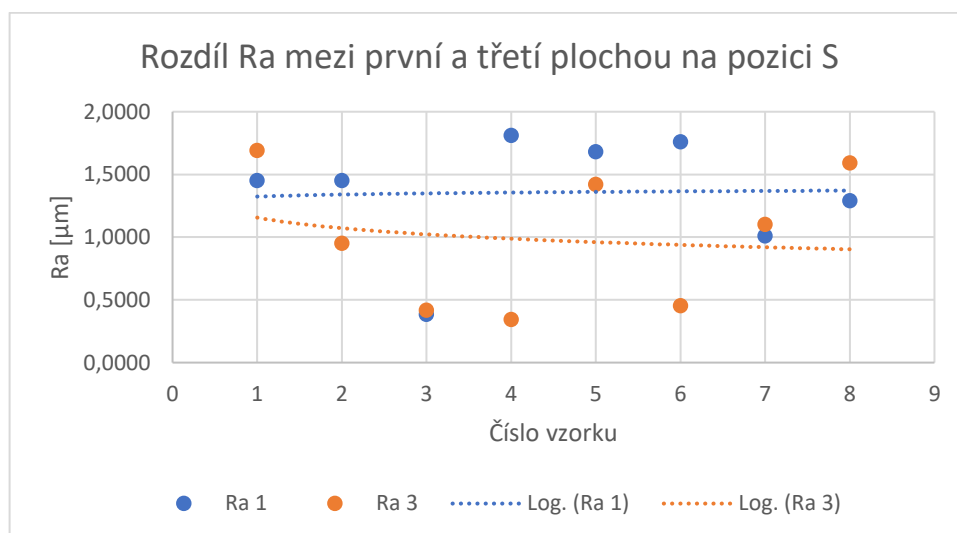
Z grafů je možné vyčíst, že třetí strana má lepší hodnoty drsnosti povrchu. To může být hlavně tím, že jsou již dvě předchozí strany opracovány, a tudíž širě obráběné plochy je o něco menší. Dalším z vysvětlení může být upnutí vzorku do svěráku. Při opracovávání třetí strany je jedna ze stran, která se dotýká stěn svěráku již opracovaná, a tudíž lépe doléhá. To by znamenalo větší třecí sílu a menší možnost výskytu vibrací při opracovávání. Grafy jsou pro větší přehlednost umístěny na následující samostatné stránce.



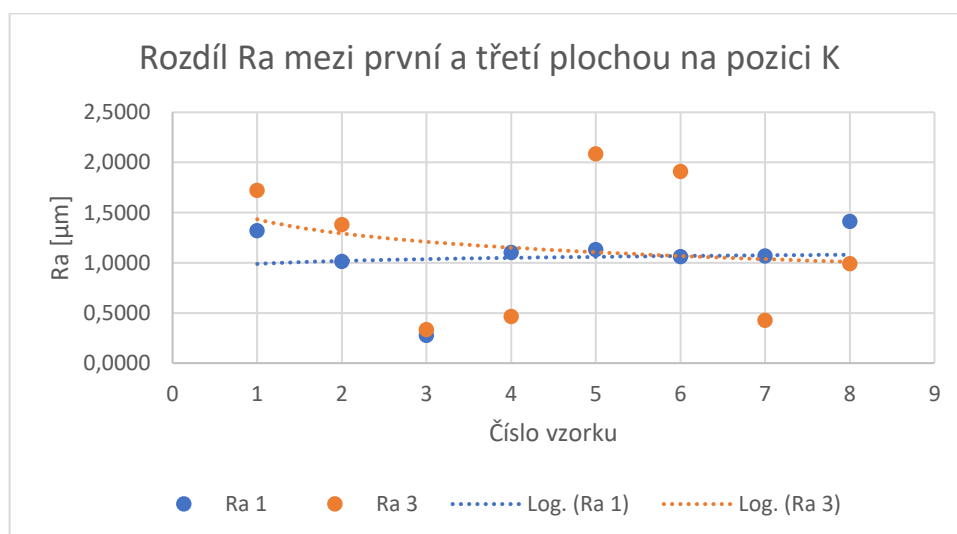
*Obr. 33 - a) řez vzorkem před prvním opracováním, b) řez vzorkem před třetím opracováním, které byly opracovány hloubkou řezu 1mm, c) řez vzorkem před třetím opracováním, které byly opracovány hloubkou řezu 1,5mm*



Graf 11 – Rozdíl hodnot Ra mezi první a třetí opracovanou plochou na pozici Z

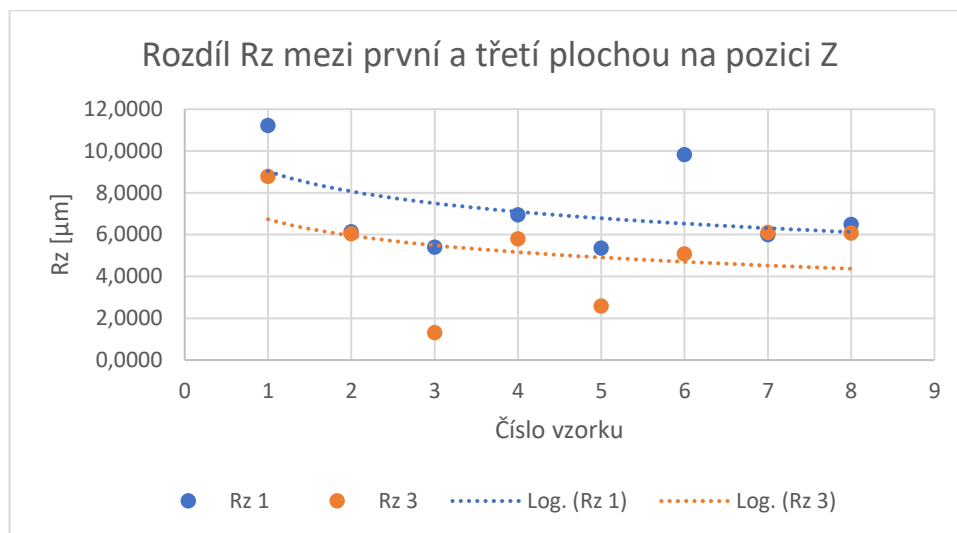


Graf 12 – Rozdíl hodnot Ra mezi první a třetí opracovanou plochou na pozici S

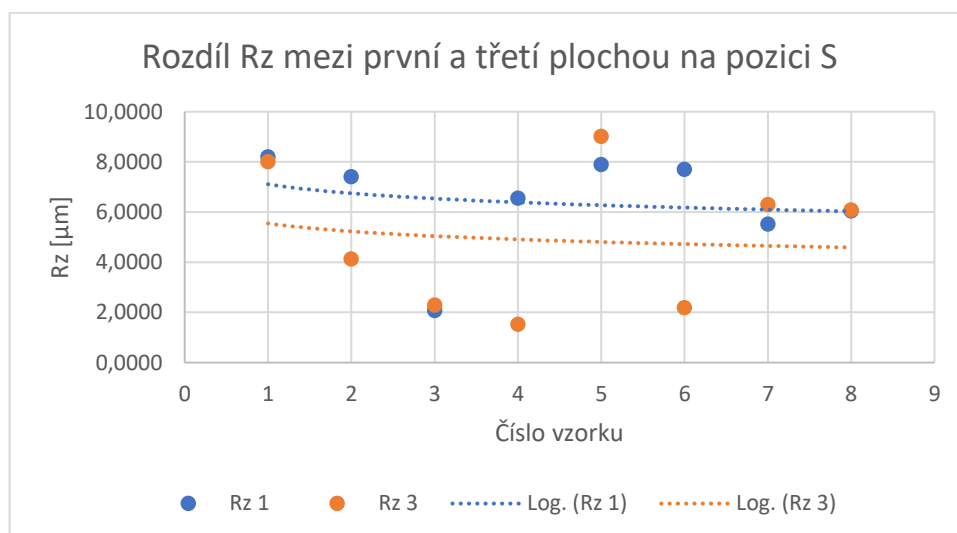


Graf 13 – Rozdíl hodnot Ra mezi první a třetí opracovanou plochou na pozici K

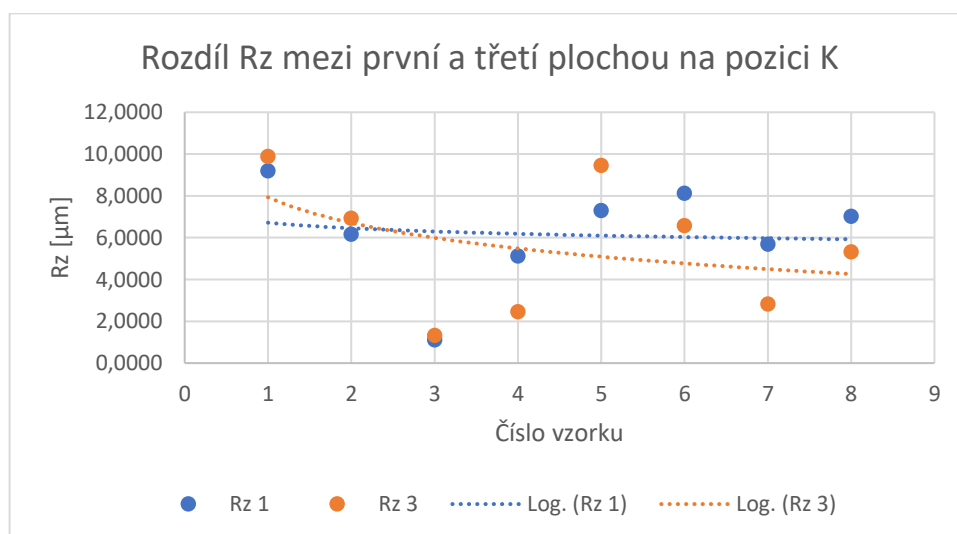




*Graf 14 – Rozdíl hodnot Rz mezi první a třetí opracovanou plochou na pozici Z*



*Graf 15 – Rozdíl hodnot Rz mezi první a třetí opracovanou plochou na pozici S*



*Graf 16 – Rozdíl hodnot Rz mezi první a třetí opracovanou plochou na pozici K*

## 6.2. Výsledky zbytkového napětí

Zbytková napětí byla změřena vždy u všech vzorků ve třech bodech na první a třetí (protilehlé) ploše, jak je představeno v návrhu experimentu. Všechny body měření byly na všech vzorcích a jejich plochách voleny v ose ve vzdálenosti 30 mm od konců. Další (třetí) měřicí bod na každé ploše se nacházel uprostřed plochy. Byly měřeny hodnoty normálového a smykového napětí. Výsledky měření byly sepsány do tabulky, z nichž byly vloženy do sloupcových grafů viz níže. Následně proběhlo vyhodnocení naměřených hodnot.

Vzorek	Pozice	Normálové napětí			Smykové napětí		
1/1	Z	456,2	±	7,1	36,5	±	3,6
	S	304	±	8	44,2	±	4
	K	497,3	±	8,2	43,6	±	4,1
2/1	Z	460,6	±	8,1	34,4	±	4,1
	S	481,9	±	6,9	37	±	3,5
	K	568,4	±	8,6	33,7	±	4,3
3/1	Z	460,5	±	5,4	32,2	±	2,7
	S	458,2	±	3,9	39,8	±	2
	K	526	±	7,8	35,3	±	3,9
14/1	Z	435	±	8,2	22,9	±	4,1
	S	457,8	±	7,1	32,1	±	3,6
	K	603,1	±	7,6	28,2	±	3,8
5/1	Z	565,7	±	8,6	48,6	±	4,3
	S	492	±	6,9	44,4	±	3,5
	K	628,9	±	9,1	45,6	±	4,6
6/1	Z	557,5	±	7,1	33	±	3,6
	S	538,3	±	10,2	42,4	±	5,2
	K	584	±	7,5	36,1	±	3,8
7/1	Z	275,9	±	5,2	25,7	±	2,6
	S	358	±	5,5	39,8	±	2,8
	K	360,6	±	5,7	31,1	±	2,9
8/1	Z	335,3	±	5	28	±	2,5
	S	592,3	±	5,9	28	±	3
	K	626,4	±	7,9	27,3	±	4

Tab. 12 - Naměřené hodnoty zbytkového napětí na první straně vzorků

Vzorek	Pozice	Normálové napětí			Smykové napětí		
1/3	Z	427,8	±	7,8	44,7	±	4
	S	452,9	±	5,5	36,7	±	2,8
	K	570	±	9,1	33,1	±	4,6
2/3	Z	480,8	±	8,4	26,1	±	4,2
	S	517,2	±	6,7	24,2	±	3,4
	K	548	±	8,2	27,1	±	4,1
3/3	Z	463,3	±	6,6	28,3	±	3,3
	S	508,1	±	6,1	29,4	±	3,1
	K	402,1	±	7,8	34,2	±	3,9
14/3	Z	326,2	±	8,3	21,4	±	4,2
	S	422,7	±	7	16,7	±	3,5
	K	398	±	7,1	23,3	±	3,6
5/3	Z	558,4	±	8,1	34,1	±	4,1
	S	527,6	±	5,5	37,1	±	2,9
	K	650,5	±	7,5	40,3	±	3,8
6/3	Z	581	±	8,8	22,5	±	4,4
	S	493,2	±	7,3	34,2	±	3,7
	K	525,5	±	5,7	32,5	±	2,9
7/3	Z	497,8	±	4,6	22,6	±	2,3
	S	498,2	±	6,9	29,1	±	3,5
	K	394,7	±	6,2	34,6	±	3,1
8/3	Z	491,9	±	8,2	16,7	±	4,2
	S	667,2	±	7,7	16,8	±	3,9
	K	574,4	±	9,2	30,2	±	4,6

Tab. 13 - Naměřené hodnoty zbytkového napětí na třetí straně vzorků

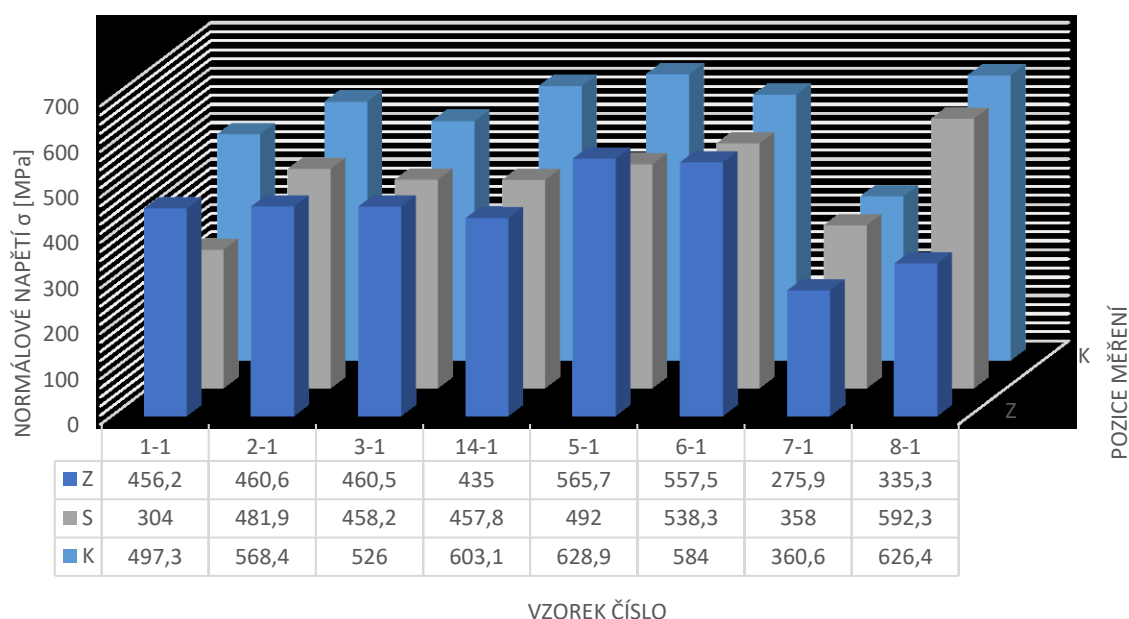
Pro lepší přehled je na dalších stranách tabulka 13 převedena do čtyř grafů. První graf ukazuje hodnoty normálového napětí na všech 8 vzorcích opracovaných na první obráběné ploše. Dále je rozdělen do tří řad, které určují místo měření vzorku, přičemž první řada „Z“ znamená začátek vzorku, „S“ znamená střed vzorku a „K“ konec vzorku. Toto označení je dále použito ve všech grafech a tabulkách.

Druhý graf je totožný s tím prvním, akorát místo první opracované plochy se jedná o třetí opracovanou plochu vždy na stejném vzorku se stejnými parametry obrábění.

Třetí graf znázorňuje opět všech 8 vzorků s třemi místy měření na první opracované ploše, ale danou měřenou hodnotou je nyní smykové napětí.

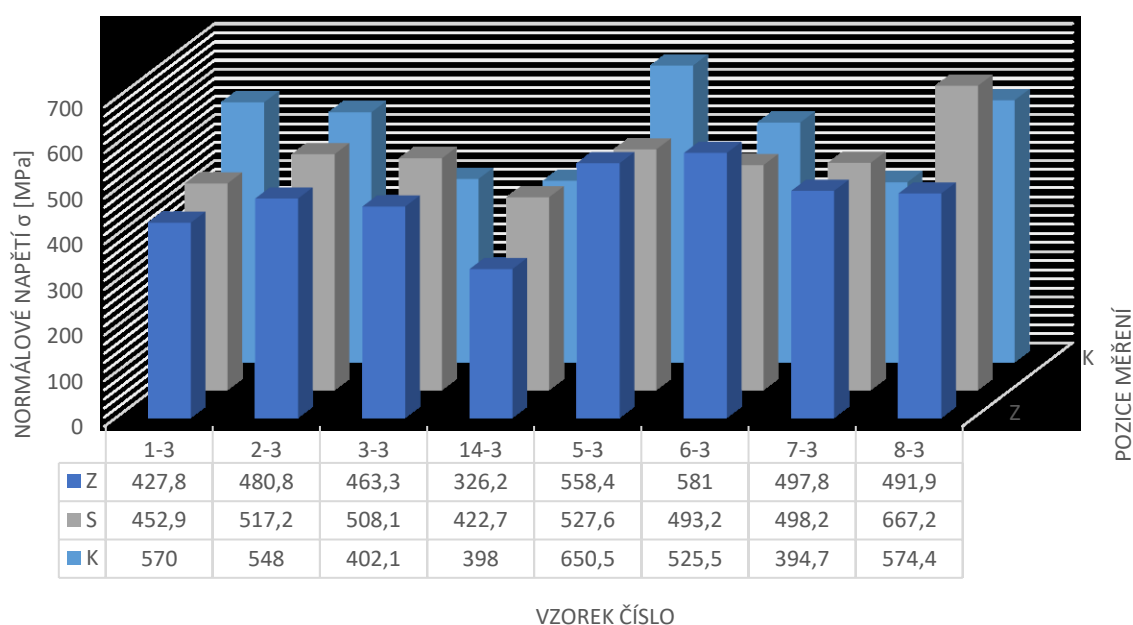
Čtvrtý graf znova hodnoty smykového napětí naměřených na třetí opracované ploše vzorků.

## Hodnoty normálového napětí na první opracované ploše



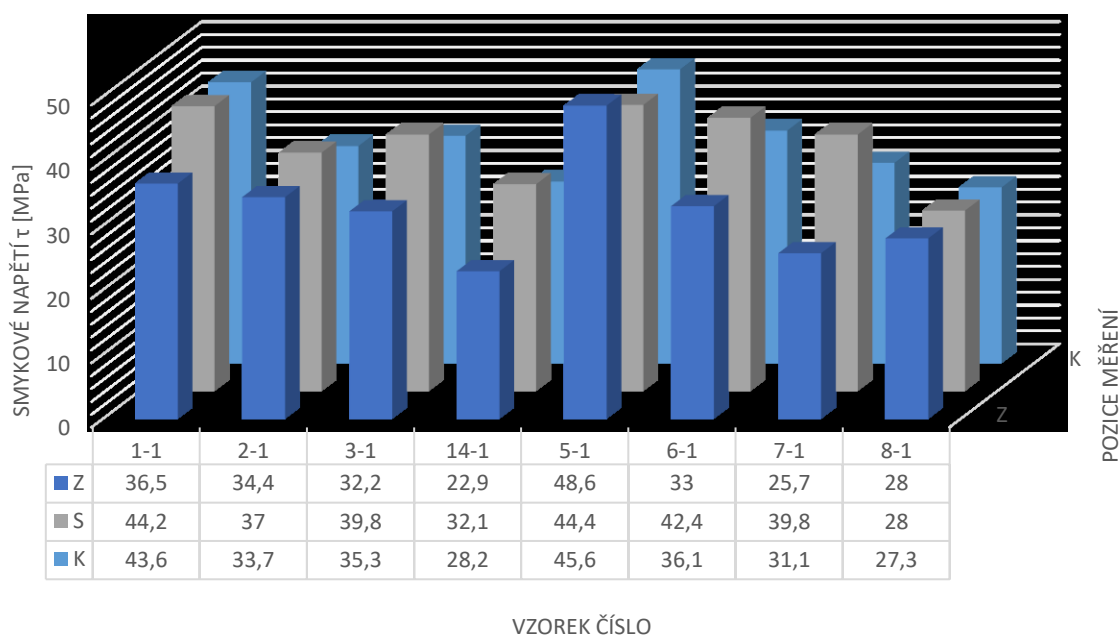
Graf 17 – Hodnoty normálového napětí na první opracované ploše vzorků

## Hodnoty normálového napětí na třetí opracované ploše



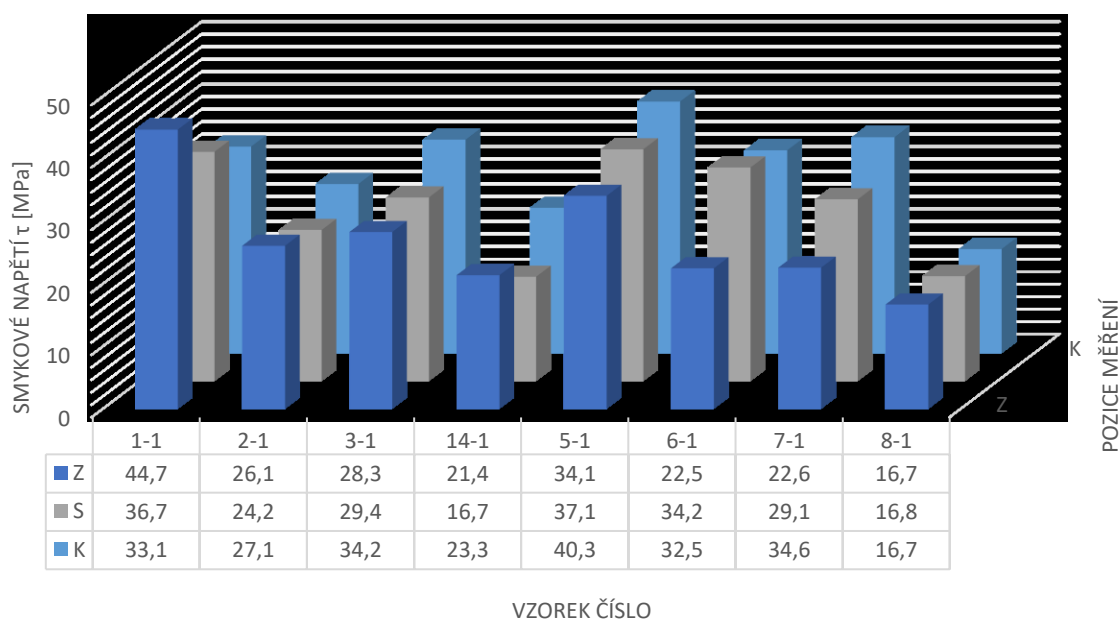
Graf 18 – Hodnoty normálového napětí na třetí opracované ploše vzorků

## Hodnoty smykového napětí na první opracované ploše



Graf 19 – Hodnoty smykového napětí na první opracované ploše vzorků

## Hodnoty smykového napětí na třetí opracované ploše

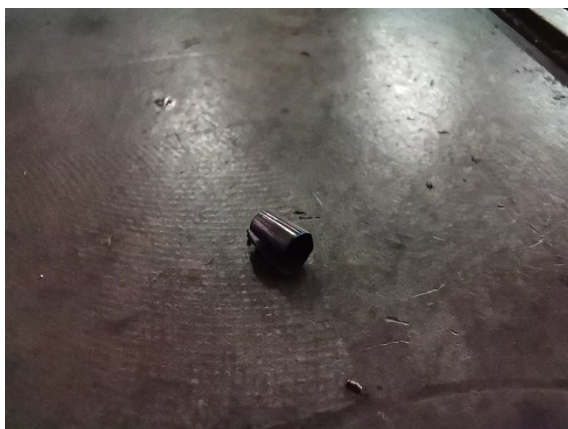


Graf 20 – Hodnoty smykového napětí na první opracované ploše vzorků

Výsledky naměřených hodnot nejeví nijak velké rozdíly. Hlavně hodnoty prvních čtyř vzorky jsou téměř totožná. Tyto naměřené hodnoty poukazují, že u těchto vzorků nebylo docíleno HSC obrábění. Jak již bylo psáno dříve, byli jsme limitováni maximálními parametry stroje. Vzorek č. 7 a vzorek č. 8 byl opracován nejvyššími možnými parametry, a právě u těchto vzorků je možno vidět výkyv na měřených hodnotách. U vzorku číslo 7 je naměřené nižší normálové napětí a smykové napětí je lehce pod průměrem naměřených hodnot. Hodnoty vzorku číslo 8 vykazují značný pokles smykového napětí. Tento vzorek oproti vzorku číslo 7 byl opracován s větší hloubkou řezu.

### 6.3. Poznatky z obrábění

Při opracovávání vzorků nebylo cílem měření teplot vzniklých při opracovávání, avšak kusy těsně po obrobení měly teplotu lehce nad tělesnou teplotou a bez problémů se daly vzít holou rukou. Třísky byly drobené a částečně zakalené. Rozdíl teplot odcházející v tříse lze porovnat na barvě třísky viz obrázek 34. Tříska ze vzorku 8-1 měla značně vyšší teplotu než tříska ze vzorku 1-1. Při HSC obrábění by tříska měla dosahovat ještě vyšších teplot a zbarvení téměř do fialova.



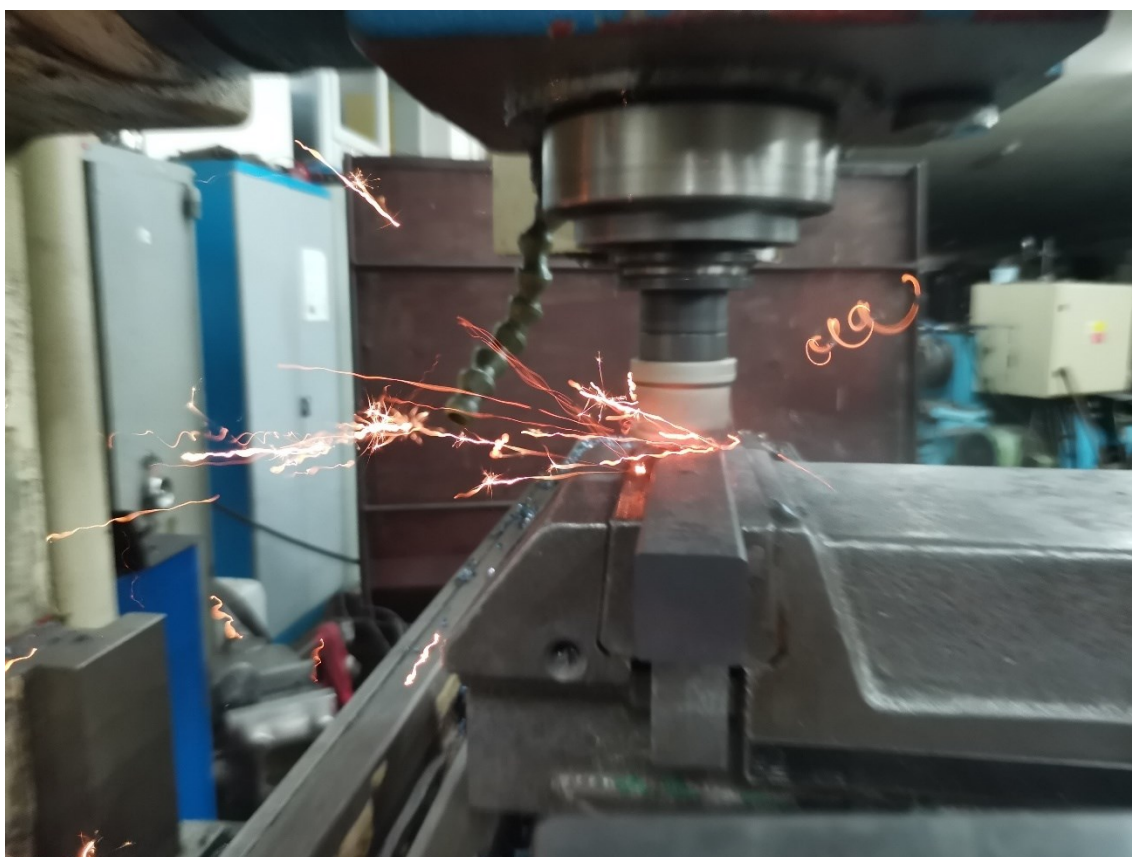
*Obr. 34 – Vlevo třísky ze vzorku 1-1, vpravo třísky ze vzorku 8-1*

Dalším ukazatelem rozdílné teploty je znázorněn na dalších obrázcích, kde je zachycen odchod třísek od nástroje. Zatím co u nižších posuvů a řezné rychlosti, kde třísky odcházely jedním směrem a bez zápalu, u vyšší řezné rychlosti a vyššího posuvu začaly třísky odcházet všemi směry a mít zápaly. Další fotografie a videa z obrábění vzorků jsou přiloženy v příloze na data disku.





*Obr. 35 – Opracovávání vzorku 2-1, třísky bez zápalu odchází jedním směrem*



*Obr. 36 – Opracovávání vzorku 8-1, třísky se zápalý odchází všemi směry*

## **7. Zhodnocení výsledků a přehled kladů pro praxi**

### **7.1. Vyhodnocení naměřených hodnot drsnosti povrchu**

Experimentem byl prokázán vliv řezné rychlosti a posuvu na parametry drsnosti povrchu. Lepší drsnosti povrchu je možno docílit snížením posuvu na zub a hloubkou řezu. Rovněž a zároveň největším faktorem, kterým bychom docílili lepší drsnosti povrchu, je zvýšení řezné rychlosti. Dalo by se tak potvrdit, že u HSC obrábění může být lepší povrch obrobku. Avšak řezná rychlost není jediným faktorem, který může drsnost povrchu ovlivnit. I v experimentu se občas našel nějaký výkyv, mimo předpoklad. Měření mohlo být zatíženo chybou. Také mohl nastat problém v sestavě stroj-nástroj-obrobek, vágnosti i tuhosti upínače a dalšími faktory, které mohou mít vliv na proces obrábění.

Původní měření probíhalo dotykovou metodou přístrojem Mitutoyo Surftest SJ210 ihned po opracování vzorků. Nicméně naměřená data byla špatně uložena do počítače a veškerá naměřená data byla ztracena. Tento fakt byl zjištěn až ve chvíli, když vzorky v tu dobu byly už v Žilině na univerzitě a státní hranice byly zavřeny, požádali jsme p. doc. Ing. Michala Šajgalíka, PhD o pomoc se zasláním vzorků zpět. Avšak pán docent byl tak hodný a nabídl proměření vzorků u nich na katedře a zasláním naměřených parametrů.

### **7.2. Vyhodnocení naměřených hodnot zbytkových napětí**

Měření zbytkových napětí rentgenovou difrakční metodou bylo provedeno v laboratoři Žilinské univerzity za pomoci doc. Ing. Michala Šajgalíka, PhD. Naměřené hodnoty potvrdily kladný vliv HSC obrábění na zbytková pnutí v povrchové vrstvě. Avšak pouze na maximálních parametrech stroje. Pro lepší a úplné potvrzení je třeba provést experiment na jiných strojích, které dosahují vyšších parametrů pro obrábění. To bylo původně v plánu, ale bohužel situace nám to neumožnila.



## 8. Závěr diplomové práce

Úvodem bylo cílem zpracovat rešerši současného stavu vysokorychlostního obrábění, integrity povrchu a DOE. V rešerši byla postupně zpracována témata jako teorie HSC obrábění, historie, tvorba třísky, využití a přínos HSC obrábění. Dalším tématem byla integrita povrchu, ve které bylo zaměřeno hlavně na téma drsnosti povrchu a jejího měření a rovněž na zbytková pnutí a jejich měření. Jako poslední byla sepsána metoda plánování experimentů „Design on Experiments“.

Na základě analýzy „Design of Experiment“ byl navržen plán experimentu a stanovený vhodné parametry pro obrábění daného materiálu. Byl stanoven počet 8 zkušebních vzorků, které byly opracovány dle stanovených řezných parametrů. Jako hlavní parametry byly stanoveny posuv na zub, řezná rychlost a hloubka řezu.

Dalším krokem bylo vyhodnocení drsnosti povrchu v závislosti na řezných podmínkách. Bylo potvrzeno, že řezná rychlost má vliv na drsnost povrchu. Vyšší řezná rychlost má lepší hodnoty drsnosti povrchu. Rovněž se dá říct, že menší posuv na zub má obdobný vliv. Tudíž pokud bychom chtěli dosáhnout lepší drsnosti povrchu měli bychom zvýšit řeznou rychlost (otáčky) a snížit posuv na zub, případně i menší tříška má malý vliv na lepší povrch.

Následně bylo vyhodnoceno zbytkové napětí. Naměřené hodnoty byly také sepsány do tabulky a přehledných grafů. Z naměřených dat byl potvrzen výskyt tlakového napětí. Cílem prokázat vliv HSC obrábění na zbytkové napětí nebyl zcela prokázán, jelikož jsme byli limitováni maximálními parametry stroje. Avšak u maximálních hodnot byl naměřen výkyv a zbytkové napětí bylo menší, což by vliv HSC obrábění potvrzovalo. Pro platné a úplné potvrzení by bylo třeba experiment opakovat na jiných strojích a více měřeních.

Jako celkové zhodnocení výsledku diplomové práce bych doporučil pro obrábění daného materiálu na strojích s podobnými parametry použít následující řezné hodnoty. Pokud by byla požadována lepší drsnost povrchu a nevadila by střední hodnota zbytkových pnutí volil bych hodnoty, které byly použity na vzorku č. 3: posuv na zub  $f_z = 0,1$ ; řezná rychlost  $v_c = 220$  a hloubka třísky  $a_p = 1$  mm. Pokud bychom volili nižší zbytkové pnutí i lepší drsnost povrchů (o něco málo horší než předchozí hodnoty) volil bych hodnoty, které byly použity na vzorku č. 7: posuv na zub  $f_z = 0,13$ ; řezná rychlost  $v_c = 220$  a hloubka třísky  $a_p = 1$  mm. Z hlediska efektivity bych znovu doporučil hodnoty ze vzorku č. 7. Rychlejší strojní čas, vyšší teplota odvedená v třísce což má pozitivní vliv na výdrž řezného nástroje.

Mým názor je a dovolím si tvrdit, že se postupně bude přecházet na vysokorychlostní obrábění, tento směr se nepřestane vyvíjet díky kladným vlivům na obrobenou plochu, ekonomickým aspektům a dalším důvodům, které HSC obrábění určitě má. Celá experimentální část práce byla realizována ve spolupráci s Žilinskou univerzitou v Žilině.

## 9. Poděkování

Děkuji tímto Ing. Jiřímu Lichovníkovi za cenné rady a připomínky při vypracování této diplomové práce.

Děkuji rovněž firmě Freso comp., s.r.o. za umožnění opracování vzorků pro diplomovou práci. Velké díky doc. Ing. Michalu Šajgalíkovi, PhD za otestování vzorků na vnitřní pnutí, a hlavně i za doměření drsnosti povrchu na žilinské univerzitě.

Diplomová práce byla vypracována v rámci projektu: „Moderní a produktivní obrábění a metrologie“, reg. č. „SP2019/60“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

## 10. Seznam použité literatury

- [1] MM spektrum [online] Praha: *MM publishing, s.r.o* [cit. 2.5.2020] Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/ekologicke-a-technologicke-aspekty-scobrabeni>>.
- [2] BRYCHTA, J., ČEP, R., SADÍLEK, M., PETŘKOVSKÁ, L., NOVÁKOVÁ, J., *Nové směry v progresivním obrábění*. [online]. Studijní materiály pro obor strojírenské technologie. Ostrava: VŠB – TUO, Fakulta strojní. 2007 [cit. 2015–02–09]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>.
- [3] EL-HOFY, Hassan. *Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1138334908.
- [4] Houdek, J.: *Rychlostní obrábění výhody a limity jeho použití ve strojírenské technologii*, 2001, 10 s.
- [5] MM spektrum [online] Praha: *MM publishing, s.r.o* [cit. 15.3.2009] Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/tvorba-trisky-pri-vysokorychlostnim-obrabeni>>.
- [6] HOUDEK, J., KOUŘIL K., *Opotřebení břitu nástrojů ze slinutých karbidů*. MM Průmyslové spektrum – Technický měsíčník pro Českou republiku a Slovensko, Prosinec 2004, č. 12., s. 20-21, ISSN 1212-2572.
- [7] SKOPEČEK, T.; VODIČKA. J. *Základy vysokorychlostního obrábění – HSC*. Plzeň: Vydavatelství Západočeské univerzity v Plzni, 2005, s. 134. ISBN 80-7343-344-2.
- [8] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [9] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.

- [10] HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění - I. část*. [online]. Studijní opory pro podporu samostudia v oboru „Strojní inženýrství“ na I. stupni MS studijního programu. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, Dostupné z [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)
- [11] PŘIKRYL, Zdeněk; MUSILÍKOVÁ, Rosa. *Teorie obrábění*. Praha: SNTL Alfa Praha, 1972. 240 s.
- [12] BUMBÁLEK, B. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. Kvalita a geometrické specifikace produktů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2005. ISSN 1801-5352.
- [13] ČSN EN ISO 4287; *mezinárodní norma Geometrických požadavků na výrobky (GPS)*. Všeobecná GPS norma (viz ISO/TR 14638).
- [14] Mitutoyo Česko s.r.o., Teplice, Česká republika. *Měření drsnosti povrchu* [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupný z WWW:<  
[http://www.mitutoyoczech.cz/cz/pdf/poster\\_drsnosti\\_ra\\_cze\\_a3.pdf](http://www.mitutoyoczech.cz/cz/pdf/poster_drsnosti_ra_cze_a3.pdf)>.
- [15] VALÍČEK, J.; *Měření drsnosti povrchů vytvořených po obrábění, teze habilitační přednášky*, Ostrava: VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní, 2008.
- [16] Metrologie: *Měření drsnosti povrchu*. In: Slideserve [online]. [cit. 2020-05-03]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/audra-ford/metrologie>
- [17] KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [18] SKOPEČEK, T.; HOFMANN, P.; ŠVANTNER, M. *Zbytková pnutí při vysokorychlostním frézování*. In MM Průmyslové spektrum. Praha: MM publishing, s.r.o., č. 5, 2007. s. 28 – 29. ISSN 1212-2572.

- [19] BUMBÁLEK, B.; BUMBÁLEK L. *Zbytková napětí a jejich význam při řešení integrity povrchu*. Strojírenská technologie, ročník XI, 3/2006, s. 9-17.  
ISSN 1211-4162
- [20] WITHERS, P.J. a H.K.D.H. BHADESHIA. *Residual stress. In: Part 1 – Measurement techniques* [online]. 2001 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z:  
[http://kntu.ac.ir/DorsaPax/userfiles/file/Mechanical/OstadFile/dr\\_nakhodchi/Part1.pdf](http://kntu.ac.ir/DorsaPax/userfiles/file/Mechanical/OstadFile/dr_nakhodchi/Part1.pdf)
- [21] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text* [CD-ROM]. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011.  
ISBN 978-80-248-2533-5.
- [22] VLK, Miloš, Lubomír HOUFÉK, Pavel HLAVOŇ, Petr KREJČÍ, Vladimír KOTEK a Jiří KLEMENT. *Experimentální mechanika*. Brno, 2003, 147 s. Dostupné z:  
[http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni\\_mechanika.pdf](http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni_mechanika.pdf)
- [23] ROSSINI, N.S. *Materials in engineering: Methods of measuring residual stresses in components*. Itálie: Mechanical and Management Engineering Department, 2012, 572–588 s. ISBN 0261-3069.
- [24] SKOPEČEK, Tomáš, Petr HOFMANN. *Zbytková pnutí při vysokorychlostním frézování*. 2. 11. 2007, <https://www.mmspektrum.com/clanek/zbytkova-pnuti-pri-vysokorychlostnim-frezovani.html>
- [25] FITZPATRICK, M.E., A.T. FRY, P. HOLDWAY, F.A. KANDIL, J. SHACKLETON a L. SUOMINEN. *Determination of residual stresses by X-ray diffraction. In: Measurement Good Practice Guide No. 52* [online]. Teddington, 2005, s. 77 [cit. 2020-05-07]. ISSN 1368-6550.
- [26] Laboratoř rentgenové difrakce. In: Fyzikální ústav, Akademie věd České republiky [online]. Praha, 2010 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z:  
<https://www.fzu.cz/oddeleni/oddeleni-strukturni-analyzy/laboratories/laborator-rentgenove-difrakce-na-praskovych-vzorci>

- [27] TOŠENOVSKÝ, J., NOSKIEVIČOVÁ, D.: *Statistické metody pro zlepšování jakosti*. Montanex, Ostrava, 2000, 362 s., ISBN 80-7225-040-X
- [28] BLECHARZ, P.: *Základy metody DOE (Taguchiho přístup)*. Repronis Ostrava, 2005, 124 s., ISBN 80-7329-106-1
- [29] DOE (Design of Experiments). Management Mania [online]. 2015 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/design-of-experiments>
- [30] ČSN 41 9313 *Ocel 19 313 Mn-Cr-V = Manganese-Chromium-Vanadium tool steel* 19 313.
- [31] Konzolová frézka FGV 32. TOS-Olomouc [online]. Olomouc [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.tos-olomouc.cz/cz/vyrobní-program/univerzální-produkční-frezky/konzolova-frezka-fgv-32/>
- [32] FeedMill: FF FW D50-22-06-C. Iscar: Cutting tools [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/Ecatalog/item.aspx?cat=3104752&fnum=1589&mapp=ML&app=131&GFSTYP=M&isoD=1>
- [33] Surftest SJ-210- Series 178-Portable Surface Roughness Tester. Mitutoyo: ecatalog [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://ecatalog.mitutoyo.com/Surftest-SJ-210-Series-178-Portable-Surface-Roughness-Tester-C1794.aspx>
- [34] BARCUCH, J. Optimalizace nástrojové řezné geometrie pro vysokorychlostní obrábění tenkostěnných součástí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 79 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc..
- [35] Dimensional metrology and roughness measurement. InfiniteFocus. [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: [https://www.alicon.com/products/infinitefocus/?fbclid=IwAR15ZRmXp7jvTuovs0GLNaM3f\\_7yRDWCXEOZCbUi0Y86mpWPQi64QHkk5sg](https://www.alicon.com/products/infinitefocus/?fbclid=IwAR15ZRmXp7jvTuovs0GLNaM3f_7yRDWCXEOZCbUi0Y86mpWPQi64QHkk5sg)

## 11. Seznam obrázků

Obr. 1 – Závislost teploty na čele nástroje na řezné rychlosti .....	14
Obr. 2 – Třísky po HSC obrábění (a) Soudržná tříska, (b) článkovitá tříska .....	16
Obr. 3 – Průběh tvorby třísky .....	16
Obr. 4 – Mechanismus tvorby třísky pro konvenční a HSC obrábění .....	17
Obr. 5 – Rozdělení odváděného tepla v závislosti na $v_c$ pro obrábění oceli .....	18
Obr. 6 – Oblast použití řezných nástrojů s ohledem na materiál .....	19
Obr. 7 – Průměrná aritmetická úchylka profilu $R_a$ .....	22
Obr. 8 – Celková výška profilu drsnosti $R_t$ , největší výška profilu $R_z$ a maximální prohlubeň profilu drsnosti $R_{z1max}$ .....	23
Obr. 9 – Průměrná šířka prvků profilu $R_{Sm}$ jako průměrná hodnota šířky $X_{si}$ profilu součástí .....	23
Obr. 10 – Měření drsnosti povrchu dotykovou metodou .....	24
Obr. 11 – Měření drsnosti povrchu metodou světelného řezu .....	24
Obr. 12 – Měření drsnosti povrchu metodou s využitím interference světla .....	25
Obr. 13 – Vzorkovnice drsností povrchů .....	25
Obr. 14 – Napětí .....	26
Obr. 15 – Průběhy makroskopických a mikroskopických napětí .....	27
Obr. 16 – a) Zařízení SINT MTS3000 pro měření zbytkových napětí odvrtávací metodou; b) tenzometrická růžice a fréza pro měření zbytkových napětí .....	30
Obr. 17 – Porovnání metod .....	30
Obr. 18 – Dělicí metoda .....	30
Obr. 19 – Změna Braggova úhlu při zatížení krystalické mřížky silou $F$ .....	32



Obr. 20 – Plochý vzorek v uspořádání na odraz (Bragg-Brentano geometrie) s rentgenovým zářením CuK $\alpha$ . (1) Rentgenová lampa poskytující záření CuK $\alpha$ ; (2) Detector PIXcell; (3) Držák s rotujícím plochým vzorkem. ....	33
Obr. 21 – Princip plánování experimentu DOE.....	35
Obr. 22 – Vzorky materiálu oceli 19 313 .....	36
Obr. 23 – Popouštěcí diagram oceli 1.2842.....	37
Obr. 24 – Frézka FGV 32, mechanický svěrák s upnutým vzorkem, mechanický svěrák s plexisklem pro uchycení fotoaparátu .....	38
Obr. 25 – Fréza FF FW D50-22-06-C a její parametry .....	39
Obr. 26 – Břitová destička FF WOCT 060212T .....	40
Obr. 27 – Schéma experimentu.....	42
Obr. 28 – Parametry bodů měření.....	43
Obr. 29 – Optický mikroskop Alicona infinite focus G5 .....	44
Obr. 30 – Sestava difraktometru Proto iXRD.....	45
Obr. 31 – FAC parametry měření .....	46
Obr. 32 – Profil měřeného vzorku .....	47
Obr. 33 - a) řez vzorkem před prvním opracováním, b) řez vzorkem před třetím opracováním, které byly opracovány hloubkou řezu 1mm, c) řez vzorkem před třetím opracováním, které byly opracovány hloubkou řezu 1,5mm .....	54
Obr. 34 – Vlevo třísky ze vzorku 1-1, vpravo třísky ze vzorku 8-1.....	61
Obr. 35 – Opracovávání vzorku 2-1, třísky bez zápalu odchází jedním směrem .....	62
Obr. 36 – Opracovávání vzorku 8-1, třísky se zápalem odchází všemi směry.....	62

## 12. Seznam tabulek

Tab. 1 – Teplota třísek při HSC .....	11
Tab. 2 – Řezné rychlosti HSC pro různé materiály .....	12
Tab. 3 – Řezné rychlosti HSC pro různé metody obrábění .....	13
Tab. 4 – Metody zjišťování zbytkových napětí .....	28
Tab. 5 – Chemické složení oceli 1.2842 .....	37
Tab. 6 – Návrh matice experimentu.....	41
Tab. 7 – Zvolené řezné parametry experimentu .....	41
Tab. 8 – Parametry při měření difraktometrem Proto iXRD .....	45
Tab. 9 – FAC parametry měření .....	47
Tab. 10 – Parametry měření drsností povrchu vzorku.....	47
Tab. 11 – Naměřené hodnoty drsnosti povrchu na vzorcích experimentu .....	48
Tab. 12 – Naměřené hodnoty zbytkového napětí na první straně vzorků .....	57
Tab. 13 – Naměřené hodnoty zbytkového napětí na třetí straně vzorků .....	58

### 13. Seznam grafů

Graf 1 - Parametr Ra na první opracované ploše experimentálních vzorků .....	13
Graf 2 - Parametr Ra na třetí opracované ploše experimentálních vzorků .....	13
Graf 3 - Parametr Rz na první opracované ploše experimentálních vzorků .....	13
Graf 4 - Parametr Rz na třetí opracované ploše experimentálních vzorků .....	13
Graf 5 - Vliv řezné rychlosti na Ra na pozici Z .....	13
Graf 6 - Vliv řezné rychlosti na Ra na pozici S .....	13
Graf 7 - Vliv řezné rychlosti na Ra na pozici K .....	13
Graf 8 - Vliv řezné rychlosti na Rz na pozici Z .....	13
Graf 9 - Vliv řezné rychlosti na Rz na pozici S .....	13
Graf 10 - Vliv řezné rychlosti na Rz na pozici K .....	13
Graf 11 - Rozdíl hodnot Ra mezi první a třetí opracovanou plochou na pozici Z .....	13
Graf 12 - Rozdíl hodnot Ra mezi první a třetí opracovanou plochou na pozici S .....	13
Graf 13 - Rozdíl hodnot Ra mezi první a třetí opracovanou plochou na pozici K .....	13
Graf 14 - Rozdíl hodnot Rz mezi první a třetí opracovanou plochou na pozici Z .....	13
Graf 15 - Rozdíl hodnot Rz mezi první a třetí opracovanou plochou na pozici S .....	13
Graf 16 - Rozdíl hodnot Rz mezi první a třetí opracovanou plochou na pozici K .....	13
Graf 17 - Hodnoty normálového napětí na první opracované ploše vzorků .....	13
Graf 18 - Hodnoty normálového napětí na třetí opracované ploše vzorků .....	13
Graf 19 - Hodnoty smykového napětí na první opracované ploše vzorků .....	13
Graf 20 - Hodnoty smykového napětí na třetí opracované ploše vzorků .....	13

## **14. Seznam příloh**

Příloha A	Měřicí protokoly drsnosti povrchu
Příloha B	Fotografie obrábění vzorků (pouze na CD)
Příloha C	Videa obrábění vzorků (pouze na CD)